RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT AGIR POUR LE CLIMAT

Rapport

SOMMAIRE

3 Avant-propos
4 Éditorial
5 Remerciements
6 Résumé exécutif

AMBITIONS, CADRAGE DE L'EXERCICE ET CONTEXTE

18 Ambitions, objectifs, méthodes
47 Société, modes de vie, récits
60 Adaptation au changement climatique

RÉCIT DES SCÉNARIOS PAR SECTEUR

01 Évolution de la consommation

79 Aménagement territorial et planification urbaine
92 Bâtiments résidentiels et tertiaires
172 Mobilité des voyageurs et transport de marchandises
231 Alimentation

02 Évolution du système productif

257 Production agricole
292 Production forestière
316 Production industrielle

03 Production d'énergie

374 Mix gaz
407 Froid et chaleur réseaux et hors réseaux
447 Biomasse énergie
474 Carburants liquides
512 Hydrogène

04 Ressources et puits de carbone

541 Déchets
574 Ressources et usages non alimentaires de la biomasse
613 Puits de carbone

RÉSULTATS ET ENSEIGNEMENTS

646 Synoptique des résultats et comparaison des scénarios
675 Enseignements, limites et perspectives

681 Sigles et acronymes
684 Glossaire

AVANT-PROPOS

Barbara Pompili,
Ministre de la Transition écologique

Dès 2019, la France a inscrit dans la loi l'objectif de neutralité carbone en 2050 – objectif désormais partagé au niveau européen avec un jalon intermédiaire de baisse des émissions de gaz à effet de serre de - 55 % à l'horizon 2030.

Il s'agit d'un défi majeur, qui nécessite d'accélérer la décarbonation de notre économie et d'explorer toutes les voies possibles pour transformer notre système énergétique tout en garantissant notre sécurité d'approvisionnement.

D'ores et déjà, nous avons voté des lois essentielles sur l'énergie, sur les mobilités, sur l'économie circulaire et sur le climat. Nous investissons massivement dans les énergies renouvelables et dans la décarbonation de notre économie avec les plans France Relance et France 2030. Mais l'atteinte de nos objectifs implique de renforcer encore l'action engagée.

L'étude « Transition(s) 2050 de l'ADEME », fruit de plus de deux années de travaux d'élaboration, est une contribution précieuse à cette réflexion. Elle dessine quatre trajectoires qui sont autant de choix de société. Qu'il s'agisse de nos manières de consommer, de nous déplacer, de nous loger ou de produire : l'ADEME œuvre à la compréhension collective des enjeux énergétiques pour les décennies à venir et de leurs impacts sur nos modes de vie.

Je salue la rigueur, la qualité et l'ambition de cet exercice inédit, qui repose sur la mobilisation d'une centaine d'experts de l'ADEME, et sur des échanges réguliers avec un comité scientifique. L'expertise de l'ADEME, agence de la transition écologique, montre ici toute sa pertinence et son utilité pour éclairer les débats et nourrir la mobilisation de tous pour la transition écologique.

C'est d'autant plus important que ces scénarios interviennent à un moment décisif. Pour faire face au rehaussement de nos ambitions en matière de réduction de nos émissions, nous venons de lancer, il y a quelques semaines, les travaux d'élaboration de notre future Stratégie Française Énergie-Climat (SFEC). Car nous devons nous assurer de la cohérence d'ensemble de nos choix, grâce à une planification des transformations à venir, qui associe État, territoires, acteurs économiques et citoyens.

Aujourd'hui, la France est en train de réaliser ce qui est sans doute l'une des plus profondes transformations de son histoire : sa transformation énergétique et écologique. Et j'ai une conviction : pour relever ce défi avec succès, le cap que nous nous fixons et la trajectoire pour l'atteindre doivent être partagés et collectivement définis.

Je souhaite que cet exercice prospectif puisse y contribuer. En présentant quatre voies possibles, volontairement contrastées, pour atteindre la neutralité carbone en 2050, les travaux de l'ADEME devraient nourrir nos réflexions et nous stimuler pour inventer la trajectoire que nous choisirons ensemble. ●

EDITORIAL

Arnaud LEROY,
Président-directeur général de l'ADEME

Il est dans les gènes de l'ADEME d'éclairer les décisions de la société en préparant l'avenir pour mieux le dessiner. C'est pour cela que pendant deux ans nous avons mené des travaux de prospective pour proposer des scénarios d'une France neutre en carbone en 2050 et dont cet ouvrage présente les premiers résultats.

L'objectif de cet exercice n'est pas de proposer un projet politique, ni « la » bonne trajectoire pour parvenir à ces objectifs collectifs. Il s'agit plutôt de contribuer à rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et environnementales pour alimenter des débats nourris sur ce qui est possible et envisageable. Réussir ces transformations profondes et systémiques est en effet un enjeu de délibération sur la société durable qu'il est possible de construire collectivement et un enjeu de coordination majeur pour la mettre en œuvre.

L'ADEME propose ici quelques scénarios « types », inspirés des scénarios d'évolution socio-économique mondiale utilisés par le GIEC dans son rapport spécial 1,5 °C de 2018. Ils ne sont pas les seuls possibles et d'ailleurs d'autres acteurs présentent leur vision au même moment que nous. Leur but est d'aider à réfléchir à la nature des transformations et des choix à faire pour construire un chemin de développement compatible avec un objectif de neutralité carbone et d'aider à prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qui entraîneront des chemins différents.

Il s'agit également de fournir des éléments d'évaluation sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux associés à ces différents chemins, afin de nourrir les échanges sur une stratégie de compromis qui emportera l'adhésion.

L'exercice de prospective de l'ADEME adopte une approche innovante, dépassant largement les enjeux de l'offre et de la demande d'énergie pour couvrir également les sujets clés de la neutralité carbone et de l'adaptation au changement climatique que sont les ressources, l'usage des sols, l'évolution des modes de vie, etc.

Nous vous proposons ce premier livrable qui présente la logique des quatre scénarios et leur mise en œuvre dans chacun des secteurs d'activité, avec les conséquences sur les émissions de gaz à effet de serre, permettant de justifier l'atteinte de la neutralité carbone.

Il sera suivi de plusieurs « feuilletons » thématiques, dont les impacts macroéconomiques, l'empreinte matière et GES, le mix électrique ainsi que les résultats d'une étude sur le regard de 31 personnes sur chacun des scénarios. Ces travaux, nécessitant de fins ajustements, seront publiés un peu plus tard.

Ce document est le résultat de plus de 2 ans de travail, commencé à l'été 2019, à la fois interne mais également avec des partenaires extérieurs de différents milieux professionnels et académiques ainsi que des membres de notre conseil scientifique complété, pour la circonstance, par des personnes qualifiées qui nous ont aidés à cheminer au travers de ce paysage complexe et que je remercie chaleureusement. Nous avons choisi de ne pas nous positionner pour un scénario ou pour un autre car il nous paraît essentiel que chacun puisse prendre connaissance des résultats des quatre voies, au même niveau, afin de se faire sa propre opinion.

Mais toutes ces voies sont difficiles. Toutes nécessitent une cohérence d'ensemble des choix réalisés. Toutes exigent que ces choix soient partagés pour être acceptés et mis en œuvre. Toutes demandent des décisions rapides car les transformations sont d'une telle ampleur qu'elles doivent avoir le temps de produire leurs effets d'ici 30 ans.

Malgré l'ampleur de la tâche, je ne doute pas que vous trouverez dans ce document et dans les feuilletons à venir matières à réflexion, à débats et à décisions quel que soit votre rôle dans la société. Car il y a urgence à décider dès aujourd'hui, à tous les niveaux, d'une trajectoire collective pour relever les défis du combat climatique pendant les trente prochaines années et de contribuer à l'avenir de l'humanité sur notre belle planète. ●

Remerciements

Ce rapport est le résultat d'un travail collectif de plus de 2 ans auquel ont participé :

Pilotage du projet ADEME : Arnaud LEROY, Fabrice BOISSIER, Valérie QUINIOU-RAMUS, David MARCHAL, Éric VIDALENC, Emmanuel COMBET et Jean-Louis BERGEY.

Équipe projet ADEME : Loïc ANTOINE, Brice ARNAUD, Stéphane BARBUSSE, Robert BELLINI, Aurélien BIGO, Cyrielle BORDE, Élodie BRICHE, Miriam BUITRAGO, Gaël CALLONNEC, Guilain CALS, Laurent CHÂTEAU, Elsa CHONY, Guillaume DAILL, Rafaëlle DESPLATS, Agnès DUVAL, Nadine DUESO, Thomas EGLIN, Aïcha EL KHAMLICHI, Mathieu GARNERO, Albane GASPARD, Hervé GOUËDARD, Alice GUEUDET, Patrick JOLIVET, Stefan LOUILLAT, Arnaud MAINSANT, Quentin MINIER, Jérôme MOUSSET, Lydie OUGIER, Jean-Michel PARROUFFE, Céline PHILLIPS, Antoine PIERART, Anna PINEAU, Sylvain SOURISSEAU, Sarah THIRIOT, Audrey TRÉVISIOL, Anne VARET, Fanny VICARD, Camille VILLARD, Manon VITEL, Valérie WEBER-HADDAD.

Experts ADEME : Denis BENITA, Nadine BERTHOMIEU, Frédérique BIENVENU, Marianne BLOQUEL, Aude BODIGUEL, Luc BODINEAU, Alix BOUXIN, José CAIRE, Astrid CARDONA-MAESTRO, Lilian CARPENE, Nicolas CASTEL, Jean-Charles CAUDRON, Romuald CAUMONT, Philippe CAUNEAU, Marc CHEVERRY, Lucie COLOMB, Marc COTTIGNIES, Alba DEPARTE, Valentin DEVRIES, Nicolas DORÉ, Antoine DESWAZIERE, Bertrand-Olivier DUCREUX, Alice FAUTRAD, Isabelle FEIX, Karine FILMON, Bruno GAGNEPAIN, Laurent GAGNEPAIN, Bénédicte GENTHON, Julie GEORGES, Florence GODEFROY, Thomas GOURDON, Éric GOUARDES, Raphaël GUASTAVI, Isabelle HÉBÉ, Samira KHERROUF, Thérèse KREITZ, Bruno LAFITTE, Céline LARUELLE, Étienne LATIMIER, Anne LEFRANC, Philippe LÉONARDON, Jonathan LOUIS, Émilie MACHEFAUX, Elliot MARI, Roland MARION, Solène MARRY, Sarah MARTIN, Solange MARTIN, Stéphanie MOUSSARD, Sylvie PADILLA, Sidonie PAPPALARDO, Maxime PASQUIER, Sylvain PASQUIER, Nicolas PERAUDEAU, Adeline PILLET, Maxence POIRSON, Jean-Christophe POUET, Florence PROHARAM, Johan RANSQUIN, Anaïs ROCCI, Frédéric ROSENSTEIN, Olivia SALVAZET, Daniela SANNA, Marc SCHOEFFTER, Pierre TAILLANT, Olivier THÉOBALD, Maeva THOLANCE, Simon THOUIN, Julien THUAL, Nicolas TONNET, Yann TRÉMÉAC, Jean-Christophe VISIER (ADEME/CSTB), Jacques WIART.

Comité scientifique du projet : composé des membres du Conseil scientifique de l'ADEME à savoir Kamel BEN NACEUR, Thierry CAQUET, Hervé CHARRUE, Olivier DELABROY, Sophie DUBUISSON-QUELLIER (Présidente), Christian DUTERTRE, Gérard GIRAUDON, Carla GOHIN, Kristina HAVERKAMP, Florence JANY-CATRICE, Sophie JULLIAN, Dominique MEDA, Bernard SALHA, Ronan STEPHAN et Laurence TUBIANA, ainsi que d'experts *intuitu personae* : Luc ABBADIE, Alexis BONNEL, Patrice CHRISTMANN, Alain GRANDJEAN, Thomas GUÉRET, Anne JACOD, Benoît LEGUET, Isabelle MOMAS et Xavier MONTAGNE.

Organismes extérieurs ayant apporté leur expertise au cours d'échanges formels ou informels : Agence de l'eau Adour-Garonne, Agence de l'eau Seine-Normandie, CEREN, CGDD, CIRED, Coénove, DGEC, DHUP, EDF R&D, FNE, FNH, INSEE, LET, négaWatt, OFB, RTE, The Shift Project.

Prestataires extérieurs : Alim'Avenir, Artelys, Auxillia, bearideas, Biomasse Normandie, CERESCO, CIRED, CITEPA, Climatico, CODA Stratégies, CODEM, ENERDATA, Énergies Demain, ENTPE, FCBA, Futuribles, I4CE, I CARE, IDDRI, IFPEN, IGN, INRAE, INRIA, Lo10, OID, Pouget Consultants, Solagro, TBC Innovation, Terres Univia, Université Paris Dauphine, SOWATT.

Que toutes ces personnes, ainsi que celles qui ont participé aux webinaires des 19 mai 2020 et 15 janvier 2021, soient ici chaleureusement remerciées.

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Un exercice de prospective inédit et structuré

Ambitions et objectifs de l'exercice Transition(s) 2050

La neutralité carbone à l'horizon 2050 appartient désormais au langage commun des politiques climatiques internationales, européennes, nationales. Si sa définition est à peu près partagée, le chemin pour l'atteindre reste encore flou, voire totalement inconnu, pour la plupart des décideurs et des citoyens. Or, face à l'urgence climatique, les changements à opérer sont d'une telle ampleur qu'**il est indispensable d'accélérer les débats dès maintenant, compte tenu des délais de prise de décisions dans un cadre démocratique, comme de ceux de leur mise en œuvre.**

Quatre chemins « types », cohérents et contrastés, pour conduire la France vers la neutralité carbone.

L'ADEME n'entend pas proposer «la » bonne trajectoire, car la trajectoire qui sera décidée relève de choix politiques à prendre face à de multiples incertitudes et en cohérence avec un projet de société. Aussi l'ADEME a-t-elle privilégié de soumettre au débat, à la veille de l'élection présidentielle de 2022 et en amont des délibérations collectives sur la Stratégie Française Énergie Climat, **quatre chemins « types », cohérents et contrastés, pour conduire la France vers la neutralité carbone**. Ces quatre chemins de neutralité carbone sont mis en regard d'un scénario tendanciel s'inscrivant dans la prolongation des tendances actuelles à 2050.

Imaginés pour la France métropolitaine, ils reposent sur les mêmes données macroéconomiques, démographiques et d'évolution climatique (+ 2,1 °C en 2100). Ils aboutissent tous à la neutralité carbone du pays, mais empruntent des voies distinctes et correspondent à des choix de société différents. Ces quatre scénarios sont inspirés dans leur logique des quatre scénarios du GIEC présentés dans le rapport spécial 1.5 °C de 2018[1].

L'objectif de cet exercice est donc de :
- construire des **« profils » de scénarios** présentant une cohérence interne ;
- illustrer le **champ des options possibles à long terme** pour atteindre une neutralité carbone et en explorer les diverses implications ;
- éclairer les **décisions incontournables à court terme**.

Deux années de travaux croisés d'experts

Afin de faciliter le passage à l'action, l'ADEME a donc réalisé cet exercice de prospective inédit reposant sur deux ans de travaux d'élaboration, la mobilisation d'une centaine de collaborateurs de l'ADEME et des échanges réguliers avec un comité scientifique. Les hypothèses et modèles ont été affinés et enrichis au travers d'échanges nourris avec une centaine de partenaires et prestataires extérieurs, spécialistes des différents domaines ainsi que par l'organisation de deux webinaires, en mai 2020 et janvier 2021, qui ont réuni près de 500 participants chacun afin d'échanger sur les résultats intermédiaires.

Méthode

Pour chaque scénario, l'ADEME a construit un récit cohérent, décliné dans chaque secteur économique et social, au travers de variables structurantes ; ces récits ont ensuite été transformés en hypothèses quantitatives dans des modèles existants ou créés pour l'occasion ; plusieurs itérations successives ont été nécessaires pour vérifier, croiser et affiner ces quantifications.

Ce travail a mis en lumière les interdépendances entre les secteurs et permet de conférer à chaque scénario une structure solide et cohérente. Par ailleurs, il intègre des avancées analytiques dans des domaines jusque-là peu ou mal étudiés dans les prospectives climat. Par exemple, l'évaluation et la disponibilité de la biomasse, l'évaluation des puits biologiques et technologiques de CO_2 ou encore l'évolution de la production industrielle induite par celles de la consommation.

La description des scénarios couvre les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, bioénergies, gaz, hydrogène, chaleur et électricité).

Les paramètres étudiés couvrent notamment :
- la demande en énergies ;
- la consommation d'eau d'irrigation, de matériaux de construction, d'intrants agricoles et l'usage des sols ;
- la production et la gestion de déchets ;
- la production d'énergies et la composition du bouquet énergétique ;
- les importations et exportations ;
- le bilan des gaz à effet de serre et les puits biologiques et technologiques de CO_2.

Cette première publication présente les grands enseignements de ces travaux mais certains résultats de modélisations qui n'ont pu être lancés qu'après les résultats définitifs des hypothèses sectorielles seront présentés sous forme de feuilletons entre janvier et mars 2022. C'est le cas pour le mix électrique, l'empreinte matière et l'empreinte gaz à effet de serre, ou encore les impacts macroéconomiques, qui ne sont présentés que qualitativement dans cette publication.

1 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf.

9 messages clés

01

Les quatre voies présentées, chacune dotée de sa propre cohérence, permettent à la France d'atteindre la neutralité carbone en 2050. **Mais toutes sont difficiles et nécessitent une planification orchestrée des transformations, associant État, territoires, acteurs économiques et citoyens.**

02

Atteindre la neutralité repose sur des paris forts, aussi bien sur le plan humain (changements de comportements) que technologique (puits de carbone en particulier). Tous les scénarios comportent donc une part de risque. Mais tous n'entraînent pas les mêmes conséquences environnementales, sociales et économiques.

03

Pour tous les scénarios, il est impératif d'agir rapidement : les transformations socio-techniques à mener sont d'une telle ampleur qu'elles mettront du temps à produire leurs effets. Il faut entreprendre dès cette décennie la planification et la transformation profonde des modes de consommation, de l'aménagement du territoire, des technologies et des investissements productifs.

04

La réduction de la demande en énergie, elle-même liée à la demande de biens et de services, est le facteur clé pour atteindre la neutralité carbone. Cette réduction peut aller de 23 % à 55 % par rapport à 2015 suivant les scénarios, chacun reposant sur un équilibre différent entre sobriété et efficacité énergétique.

05

L'industrie va devoir se transformer non seulement pour s'adapter à une demande en profonde mutation mais également pour décarboner sa production. Cela nécessitera des plans d'investissements de grande ampleur et un effort de l'ensemble de la société pour accompagner les territoires en mutation et former les salariés aux nouveaux métiers.

06

Le vivant est l'un des atouts principaux de cette transition permettant de combiner trois leviers stratégiques : le stockage de carbone, la production de biomasse et la réduction des gaz à effet de serre. Il est donc indispensable de maintenir un équilibre entre les usages alimentaires et énergétiques de la biomasse avec la préservation des fonctions écologiques, comme la biodiversité et le stockage de carbone grâce à une approche globale de la bioéconomie.

07

L'adaptation des forêts et de l'agriculture devient donc absolument prioritaire pour lutter contre le changement climatique. La résilience des écosystèmes est d'autant plus cruciale qu'ils en subissent de plus en plus fortement les impacts.

08

La pression sur les ressources naturelles varie considérablement d'un scénario à l'autre. C'est particulièrement le cas pour l'eau d'irrigation ou les matériaux de construction, dont les volumes consommés varient d'un facteur 2 entre certains scénarios.

09

Dans tous les scénarios, en 2050 l'approvisionnement énergétique repose à plus de 70 % sur les énergies renouvelables et l'électricité est le principal vecteur énergétique. Pour autant, cela ne peut en aucun cas légitimer le gaspillage d'énergies, afin de limiter la pression sur les ressources.

		S1 GÉNÉRATION FRUGALE	S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES
MODES DE VIE	Société	• Recherche de sens • **Frugalité choisie mais aussi contrainte** • Préférence pour le local • Nature sanctuarisée	• Évolution soutenable des modes de vie • **Économie du partage** • Équité • Préservation de la nature inscrite dans le droit
	Alimentation	• Division par 3 de la consommation de viande • **Part du bio : 70 %**	• **Division par 2 de la consommation de viande** • Part du bio : 50 %
	Habitat	• Rénovation massive et rapide • **Limitation forte de la construction neuve** (transformation de logements vacants et résidences secondaires en résidences principales)	• Rénovation massive, **évolutions graduelles mais profondes des modes de vie** (cohabitation plus développée et adaptation de la taille des logements à celle des ménages)
	Mobilité des personnes	• **Réduction forte de la mobilité** • Réduction d'un tiers des km parcourus par personne • La moitié des trajets à pied ou à vélo	• **Mobilité maîtrisée** • - 17 % de km parcourus par personne • Près de la moitié des trajets à pied ou à vélo
	Technique Rapport au progrès, numérique, R&D	• Innovation autant organisationnelle que technique • **Règne des *low-tech***, réutilisation et réparation • Numérique collaboratif • **Consommation des *data centers* stable** grâce à la stabilisation des flux	• Investissement massif (efficacité énergétique, EnR et infrastructures) • Numérique au service du développement territorial • **Consommation des *data centers* stable** grâce à la stabilisation des flux
	Gouvernance Échelles de décision, coopération internationale	• **Décision locale**, faible coopération internationale • Réglementation, interdiction et rationnement *via* des quotas	• Gouvernance partagée • **Fiscalité environnementale** et redistribution • Décisions nationales et coopération européenne
	Territoire Rapport espaces ruraux – urbains, artificialisation	• Rôle important du territoire pour les ressources et l'action • **« Démétropolisation »** en faveur des villes moyennes et des zones rurales	• **Reconquête démographique des villes moyennes** • Coopération entre territoires • Planification énergétique territoriale et politiques foncières
ÉCONOMIE	Macro-économie	• **Nouveaux indicateurs de prospérité** (écarts de revenus, qualité de la vie…) • Commerce international contracté	• Croissance qualitative, **« réindustrialisation »** de secteurs clés en lien avec territoires • Commerce international régulé
	Industrie	• **Production au plus près des besoins** • 70 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage	• Production en valeur plutôt qu'en volume • **Dynamisme des marchés locaux** • 80 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage

S3 TECHNOLOGIES VERTES

S4 PARI RÉPARATEUR

• **Plus de nouvelles technologies que de sobriété** • Consumérisme « vert » au profit des populations solvables, société connectée • Les services rendus par la nature sont optimisés	• Sauvegarde des modes de vie de **consommation de masse** • La nature est une ressource à exploiter • Confiance dans la capacité à réparer les dégâts causés aux écosystèmes	Société
• Baisse de 30 % de la consommation de viande • **Part du bio : 30 %**	• Consommation de viande quasi-stable (baisse de 10 %), complétée par des **protéines de synthèse ou végétales**	Alimentation
• **Déconstruction-reconstruction** à grande échelle de logements • Ensemble des logements rénovés mais de façon peu performante : la moitié seulement au niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC)	• Maintien de la **construction neuve** • La moitié des logements seulement est rénovée au niveau BBC • **Les équipements se multiplient**, alliant innovations technologiques et efficacité énergétique	Habitat
• Mobilités accompagnées par l'État pour les maîtriser : infrastructures, télétravail massif, covoiturage • **+ 13 % de km parcourus par personne** • 30 % des trajets à pied ou à vélo	• Augmentation forte des mobilités • + 28 % de km parcourus par personne • Recherche de **vitesse** • 20 % des trajets à pied ou à vélo	Mobilité des personnes
• Ciblage sur les **technologies les plus compétitives pour décarboner** • Numérique au service de l'optimisation • Les *data centers* consomment 10 fois plus d'énergie qu'en 2020	• Innovations tout azimut • Captage, stockage ou usage du carbone capté indispensable • Internet des objets et intelligence artificielle omniprésents : les ***data centers* consomment 15 fois plus d'énergie** qu'en 2020	Technique Rapport au progrès, numérique, R&D
• Cadre de **régulation minimale** pour les acteurs privés • État planificateur • Fiscalité carbone ciblée	• Soutien de l'offre • Coopération internationale forte et ciblée sur quelques filières clés • **Planification centralisée du système énergétique**	Gouvernance Échelles de décision, coopération internationale
• **Métropolisation**, mise en concurrence des territoires, villes fonctionnelles	• Faible dimension territoriale, **étalement urbain**, agriculture intensive	Territoire Rapport espaces ruraux – urbains, artificialisation
• **Croissance verte**, innovation poussée par la technologie • Spécialisation régionale • Concurrence internationale et échanges mondialisés	• **Croissance économique carbonée** • Fiscalité carbone minimaliste et ciblée • Économie mondialisée	Macro-économie
• **Décarbonation de l'énergie** • 60 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage	• Décarbonation de l'industrie pariant sur le **captage et stockage géologique de CO_2** • 45 % de l'acier, mais aussi de l'aluminium, du verre, du papier-carton et des plastiques viennent du recyclage	Industrie

MODES DE VIE

ÉCONOMIE

BILAN comparé des 4 scénarios

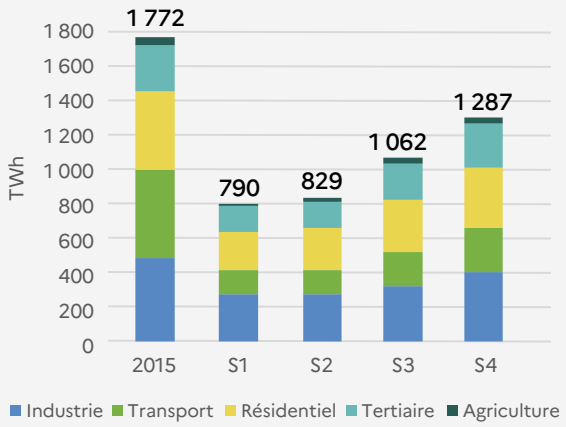
S1 Génération frugale | **S2** Coopérations territoriales | **S3** Technologies vertes | **S4** Pari réparateur

ÉNERGIE

4 mix énergétiques variés pour 2050

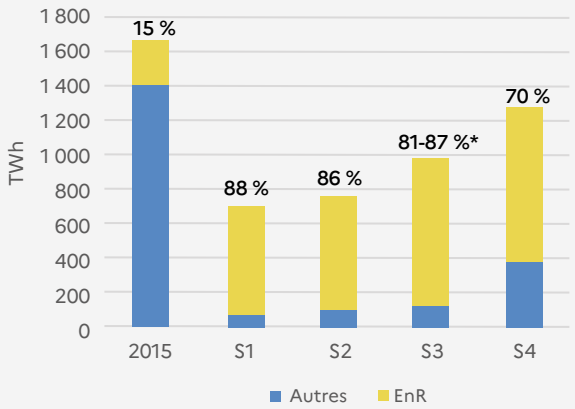
UNE DEMANDE D'ÉNERGIE À LA BAISSE

Consommation finale d'énergie par secteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors soutes internationales)



PLUS DE 70 % D'ENR DANS TOUS LES SCÉNARIOS

Consommation d'énergie et part des EnR dans la consommation finale brute d'énergie en 2015 et 2050



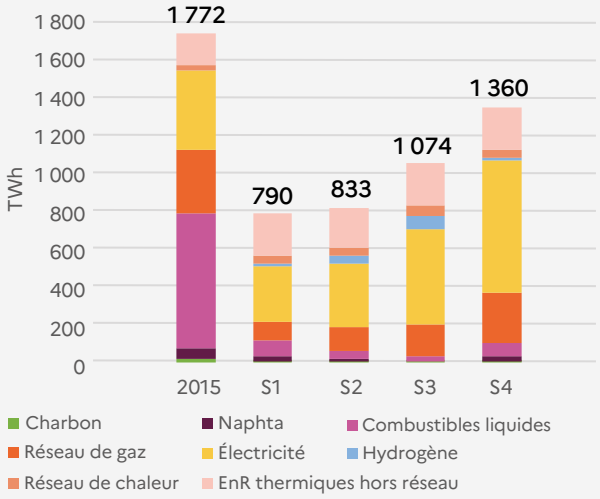
* Valeurs dépendant des choix de politiques industrielles de développement de l'éolien flottant ou du nucléaire.

UNE PART CROISSANTE DE L'ÉLECTRICITÉ

QUASI DISPARITION DES ÉNERGIES FOSSILES

UN VECTEUR GAZ QUI CONSERVE UN TALON DE CONSOMMATION

Demande finale énergétique par vecteur en 2015 et 2050 (avec usages non énergétiques et hors soutes internationales)



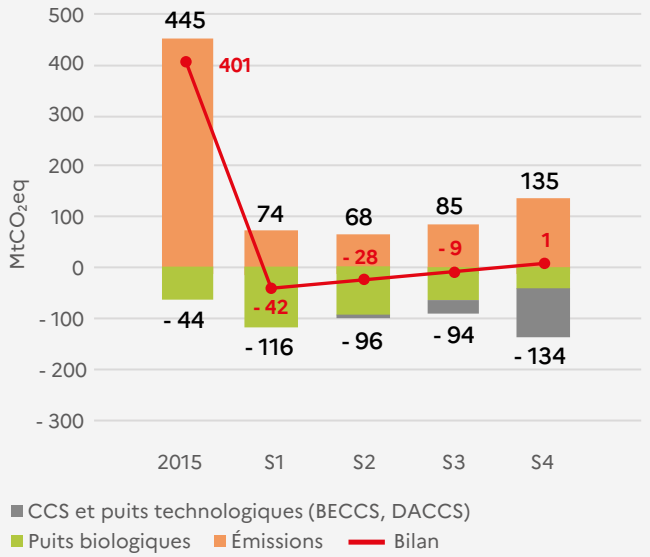
N.B. : la consommation d'énergie finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour fabriquer d'autres vecteurs énergétiques ou non énergétique comme l'hydrogène. À titre d'illustration, la consommation d'électricité (non représentée sur ce graphique) utilisée pour fabriquer de l'hydrogène à usage énergétique est respectivement de 62 TWh, 135 TWh, 65 TWh et 33 TWh dans S1, S2, S3 et S4. La différence des demandes de consommation avec le graphique de la demande d'énergie par secteur provient de la consommation des puits technologiques qui n'est affectée à aucun secteur. La différence avec la consommation finale brute d'énergie provient de la consommation pour usages non énergétiques.

CLIMAT

Le rôle majeur des puits biologiques pour l'atteinte de la neutralité en 2050

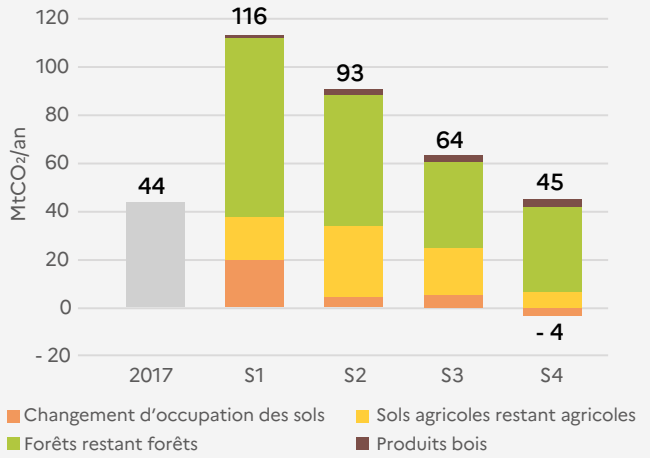
QUATRE SCÉNARIOS NEUTRES EN 2050, AVEC UN RECOURS PLUS OU MOINS IMPORTANT AUX PUITS DE CARBONE

Bilan des émissions et des puits de CO_2 en 2015 et 2050



LES PUITS BIOLOGIQUES EN CROISSANCE DANS S1 ET S2 GRÂCE À LA FORÊT ET AU CHANGEMENT DE PRATIQUES AGRICOLES

Puits naturels de carbone dans la biomasse et les sols en 2017 et 2050



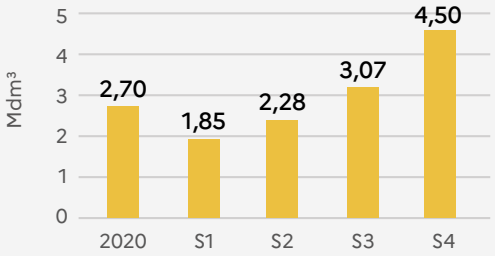
N.B. : la valeur du puits en 2017 est présentée comme référence sachant qu'elle n'a pas été calculée avec la même méthode que pour les scénarios mais à partir des valeurs de l'inventaire national réalisé par le CITEPA, en y ajoutant la séquestration de carbone dans les sols forestiers et le bois mort en forêt.

RESSOURCES

Une pression sur les ressources contrastée

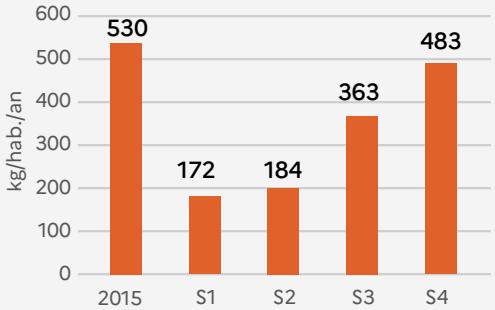
2 SCÉNARIOS LIMITENT LE RECOURS À L'IRRIGATION

Besoin en eau pour l'irrigation en 2020 et 2050



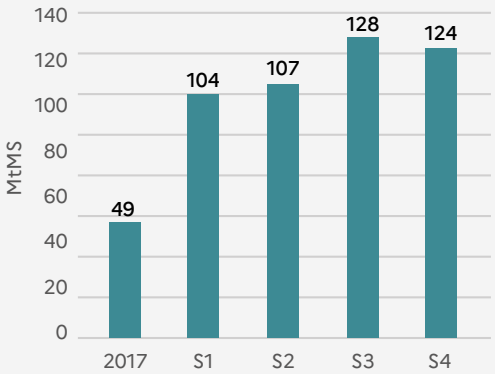
MOINS DE DÉCHETS MÉNAGERS ET ASSIMILÉS

Déchets ménagers et assimilés collectés en 2015 et 2050



UNE MOBILISATION DE LA BIOMASSE MULTIPLIÉE PAR 2 AU MOINS

Mobilisation de la biomasse pour les usages non alimentaires en 2017 et 2050



5 PROBLÉMATIQUES à mettre en débat

S1 Génération frugale ¦ **S2** Coopérations territoriales ¦ **S3** Technologies vertes ¦ **S4** Pari réparateur

PROBLÉMATIQUE #1

La sobriété : jusqu'où ?

La décarbonation de l'énergie sera d'autant plus facilitée que la demande sera faible. Or, la réduction de cette demande est déterminée par deux facteurs : la démarche de sobriété, c'est-à-dire le questionnement des modes de vie et de consommation afin de maîtriser la demande de biens et de services et l'efficacité énergétique qui permet de réduire la quantité d'énergie nécessaire à leur production. Mais le potentiel de l'efficacité énergétique se heurte à des limites physiques et surtout à celle des technologies disponibles.

On n'échappe donc pas à une interrogation sur la sobriété.

S4, le seul qui renonce à ce levier, conduit à une fuite en avant qui paraît risquée : faute de pouvoir décarboner l'énergie, la société est réduite à dépenser d'énormes quantités d'énergie pour extraire le CO_2 de l'air ambiant. Le pari technologique et économique est énorme.

S3, qui se place dans la prolongation de nos habitudes actuelles, mise sur les technologies pour augmenter le potentiel de l'efficacité énergétique, pour pouvoir se contenter d'une sobriété modérée. Cela suppose l'atteinte effective de l'équilibre entre développement de ces technologies et augmentation des consommations. Mais le temps de développement de ces technologies retarde la diminution des émissions, conduisant à un solde global d'émission important sur la période de transition.

S1 et S2 font le choix d'une mobilisation plus importante de la sobriété en changeant la logique de développement socio-économique : une consommation réduite et des modes de vie plus raisonnés qui privilégient les liens sociaux à l'accumulation de biens matériels, ce qui correspond à des aspirations qui s'affirment de plus en plus dans nos sociétés. Ainsi, S1 et S2 développent la sobriété d'usage (déplacement à pied ou à vélo, commerces de proximité privilégiés…), la sobriété dimensionnelle (alléger le poids des véhicules…) et la sobriété coopérative (habitat plutôt collectif, location d'équipements qu'on utilise peu souvent plutôt que de les acquérir…). Cette sobriété permet de sécuriser l'atteinte de la neutralité carbone : les émissions résiduelles sont plus facilement compensées par les puits de carbone naturels et la chute des émissions est suffisamment rapide pour que la somme des émissions sur toute la durée de la transition reste modérée.

La sobriété heurte cependant le mode de pensée dominant de la culture consumériste du monde moderne. Elle est souvent perçue comme une privation et s'avère clivante : ce qui semble être une privation pour une génération ou un individu donné peut au contraire apparaître comme une évidence pour un autre. Or, la mise en œuvre à grande échelle de politiques de sobriété nécessite des transformations sociales rapides et fortes, qui peuvent rencontrer de fortes résistances. S2 surmonte cette difficulté par la recherche d'un consensus social au travers d'une gouvernance ouverte, mais ceci ralentit le rythme de la transformation. S1, qui a des objectifs de sobriété beaucoup plus forts et plus rapides, doit inévitablement recourir en parallèle à la contrainte *via* la réglementation ou le rationnement *via* des quotas, ce qui impose un important effort d'explication et des compensations pour la faire accepter. La difficulté à y parvenir fait courir le risque de clivages forts, voire violents, au sein de la société.

Enfin, **le questionnement sur la sobriété ne peut être disjoint de celui sur les inégalités** : d'un côté les modes de vie actuels semblent s'accommoder des inégalités dans l'accès aux produits et services ; de l'autre, le choix de la sobriété impose de faire un réel effort d'équité, la diminution de la consommation ne pouvant être envisagée pour la partie de la population la plus modeste.

PROBLÉMATIQUE #2

Peut-on s'appuyer uniquement sur les puits naturels de carbone pour atteindre la neutralité ?

Les quatre scénarios montrent que l'atteinte de la neutralité carbone ne peut pas se passer des puits naturels de CO_2 (plantes, sols et produits) car leur potentiel est très important par rapport aux puits technologiques (captage et stockage du CO_2).

Dans S1 et S2, les scénarios les plus sobres, ces puits biologiques agricoles et forestiers peuvent être maximisés et sont suffisants (ou quasiment suffisants dans S2) grâce à une demande en énergie faible, ce qui permet de limiter les prélèvements de biomasse (forêts en particulier). Il est ainsi possible de conserver un équilibre entre exploitation de la biomasse pour décarboner, fourniture des services aux humains (loisirs, matériaux…) et faible exploitation des forêts pour préserver les services rendus par la nature (biodiversité, qualité de l'eau…). L'agriculture, avec le développement de l'agroécologie et des « pratiques stockantes » (agroforesterie, prairies…), ainsi que la très faible artificialisation des sols grâce à l'urbanisation maîtrisée, permettent également de préserver la fonction « puits » des sols. Mais cela nécessite des évolutions dans nos modes de vie qui peuvent ne pas être consensuelles.

Dans S3 et S4, le niveau d'émissions à compenser augmente et l'exploitation plus importante des milieux naturels diminue le potentiel des puits : les puits technologiques deviennent donc nécessaires.

Mais le potentiel de ceux-ci est limité : si S3 arrive à un équilibre satisfaisant entre puits naturels et puits technologiques qui permet de maîtriser leur coût, S4 se voit contraint de déployer des technologies de captage du CO_2 dans l'air qui consomment beaucoup d'électricité, qui ne sont pas matures aujourd'hui et dont on ne sait si elles le seront à temps et à quel prix. Dans ces deux scénarios, il faut stocker dans le sous-sol tout ou partie du CO_2 capté, ce qui pose des questions d'acceptation.

Sobriété, gestion de la biomasse et puits naturels sont donc intimement liés. Mais les puits naturels sont fragiles et vulnérables face au changement climatique. Sauf à faire d'énormes efforts de sobriété comme dans S1, les autres scénarios ne peuvent donc faire l'impasse d'une réflexion sur les ambitions à consacrer :

- à une politique active de développement des puits agricoles et forestiers pour augmenter leur résilience, avec des co-bénéfices probables sur la biodiversité et l'adaptation au changement climatique ;
- au développement de technologies de captage, utilisation et stockage du CO_2, pour éviter de ne dépendre que des puits naturels dont le potentiel de développement reste incertain.

PROBLÉMATIQUE #3

Qu'est-ce qu'un régime alimentaire durable ?

L'alimentation est l'un des enjeux majeurs mondiaux, avec le doublement prévu des besoins alimentaires à l'horizon 2050. En France, l'alimentation est responsable du quart de l'empreinte carbone et est à la croisée de multiples enjeux de santé et d'environnement, notamment la préservation de la biodiversité, de la qualité de l'eau et des sols. Enfin, l'alimentation est aussi au cœur de nos pratiques sociales.

La part de protéines animales dans les repas est un des facteurs de premier ordre sur l'impact environnemental de l'alimentation. À titre d'exemple, la surface agricole mobilisée (en empreinte) pour nourrir un Français moyen passe du simple au quadruple entre un régime purement végétal et un régime très carné.

Les quatre scénarios montrent que l'on ne peut pas considérer le régime alimentaire indépendamment des autres enjeux du vivant : quelle contribution attend-on de la biomasse pour la production de matériau et d'énergie ? Quel rôle veut-on donner aux puits de carbone naturels ? Quelle adaptation de l'agriculture doit-on envisager face au changement climatique qui l'affecte d'ores et déjà ?

À part S4 qui mise sur le captage technologique du CO_2 dans l'air, tous les autres scénarios doivent faire évoluer le régime alimentaire moyen des Français vers moins de protéines carnées tout en privilégiant la viande de qualité. Ceci présente de multiples co-bénéfices : libérer des terres agricoles en France et hors de France, faciliter la conversion en bio des systèmes agricoles et privilégier des systèmes moins intensifs (systèmes herbagers), relocaliser des productions et favoriser la résilience des territoires, réduire notre impact sur les écosystèmes (déforestation importée). Les trois premiers scénarios montrent cependant que différents modèles agricoles et alimentaires sont possibles, à condition de les développer en cohérence avec les autres dimensions de la transition.

PROBLÉMATIQUE #4

Artificialisation, précarité, rénovation : une autre économie du bâtiment est-elle possible ?

Les bâtiments résidentiels et tertiaires représentent aujourd'hui près de la moitié de la consommation d'énergie nationale et près d'un quart des émissions de GES ; ils consomment 51 millions de tonnes de matériaux par an pour leur construction et participent directement à l'artificialisation des sols. Sur le plan social, le logement représente 30 % du budget des ménages, la précarité énergétique touche plus de 5 millions de ménages et le mal logement concerne environ 4 millions de personnes.

À côté de cela, **les tendances récentes aboutissent à une certaine multiplication des équipements et à une utilisation de surfaces de bâtiment croissante** (décohabitation, logements et bureaux vacants, développement des résidences secondaires).

Dans S1 et S2, il est possible de limiter les impacts du bâtiment non seulement par une réhabilitation massive et efficace mais également par l'abandon du rêve de maison individuelle au profit d'un habitat collectif respectant l'intimité de chacun mais plus convivial et développant le partage de pièces entre plusieurs appartements ou d'équipements (machines à laver par exemple), la transformation des résidences secondaires en habitat principal ou encore la sobriété dans l'usage des équipements électriques et numériques. Mais ces changements de société ne sont pas faciles. S3 et S4 misent plus sur la technologie et sur la construction neuve (en particulier S3 qui est un scénario haussmannien de déconstruction/reconstruction) mais avec une consommation de matières et d'énergie (production du ciment et des matériaux) très élevée, nécessitant de nouvelles carrières ou des extensions de plus en plus mal acceptées par les populations environnantes.

Les choix sur le bâtiment ont des conséquences sur le modèle industriel : la consommation massive de ciment et d'acier augmente fortement les émissions de l'industrie. Les modèles de S1 et S2, fondés sur la rénovation, vont ainsi de pair avec un modèle industriel plus sobre fondé sur l'économie circulaire. En matière sociale, les emplois créés dans la rénovation massive des logements pourraient plus que compenser les pertes de ceux de la construction neuve.

PROBLÉMATIQUE #5

Vers un nouveau modèle industriel : la sobriété est-elle dommageable pour l'industrie française ?

Par opposition aux 30 années passées, il est aujourd'hui communément admis que **relocaliser l'industrie en France est vital pour notre économie et sa résilience. Cette relocalisation ne va toutefois pas de soi dans un monde globalisé et ne sera pas sans impact**. La compétitivité de l'industrie va être développée avec deux leviers plus ou moins activés suivant les scénarios : un nouveau modèle industriel privilégiant la qualité à la quantité et fondé sur l'économie circulaire (S1 et S2) ou un modèle plus quantitatif, mais avec des procédés et des énergies décarbonés (S3 et S4).

Dans S1 et S2, l'industrie doit revoir son modèle d'affaires avec une production diminuée en tonnage de matériaux et de biens de consommation (-38 % pour S1 et -26 % pour S2) en raison de la sobriété des consommateurs (citoyens, entreprises et collectivités). Cela passera par des produits de qualité, plus chers mais durables, écoconçus, réparables, réutilisables et recyclables. Mais également par le développement de l'économie de la fonctionnalité, c'est-à-dire la vente d'un service plutôt que du produit, qui allie économie de matières et économie d'énergie pour une économie plus circulaire. Ces scénarios limitent par ailleurs le risque de « fuites de carbone » en évitant la délocalisation des industries lourdes dans des pays à plus faible fiscalité carbone ; dans S2, cela va jusqu'à la réindustrialisation (amélioration du solde commercial) pour certains secteurs ciblés dont la production est décarbonée.

Dans S3, la production industrielle est en légère baisse (-14 % en tonnage). Elle reste stable dans S4, avec toutefois une dégradation de la balance commerciale sur les secteurs de l'industrie lourde, pouvant potentiellement conduire à des « fuites de carbone ». Les défis industriels sont alors dans l'efficacité énergétique et la décarbonation de l'énergie (énergies renouvelables ou captage et stockage de CO_2).

Dans tous les cas, ces évolutions doivent s'accompagner :

- de plans d'investissements de grande ampleur, tant pour la massification de technologies matures que pour l'émergence d'innovations de rupture dans les procédés industriels. En effet, l'efficacité énergétique et la décarbonation deviennent des facteurs clés de compétitivité ;
- de politiques d'emplois-formations ambitieuses et d'accompagnement des territoires touchés par les mutations industrielles.

Dans ce cadre, se pose la question de la place des politiques publiques pour accompagner ces transformations, que ce soit en matière de dispositifs de soutien ou d'aménagement du territoire.

Limites et perspectives d'approfondissement

Comme pour tout exercice de prospective, certaines limites demeurent :

- **Les effets du changement climatique** sur le fonctionnement des infrastructures, des systèmes et des organisations ainsi que sur les comportements sont surtout pris en compte pour les secteurs agricoles, forestiers, bâtiments et réseau électrique, faute de travaux de référence ou d'outils de modélisation pour les autres secteurs ;

- La juxtaposition de scénarios construits sur des forces motrices très différentes peut laisser penser que ceux-ci bénéficient du même **niveau d'expertise et retours d'expériences**. Or, les connaissances en matière de sobriété ou de puits de carbone sont bien moins développées que celles sur l'efficacité énergétique ou les énergies renouvelables qui bénéficient d'études et de recherches depuis plusieurs décennies.

- **L'évaluation des conséquences sur la biodiversité** rencontre des difficultés méthodologiques liées au manque de connaissances et au fait que les données de l'exercice ne sont pas précisément localisées. Pour autant, la préoccupation de la biodiversité n'est pas absente des travaux.

- **Le « reste du monde » est considéré comme un tout** qui prend le même chemin que la France métropolitaine et, à ce titre, ne bénéficie pas d'une modélisation fine.

Les prochaines étapes de ce travail

Ce travail n'est que la première partie d'une série de feuilletons qui seront publiés entre janvier et mars 2022. L'ensemble formera alors un tout qui sera remis en perspective au cours du Grand Défi Écologique, événement organisé par l'ADEME les 29 et 30 mars 2022 à Angers.

Les sujets de ces feuilletons sont les suivants :

Analyse du mix électrique

Métaux de la transition écologique

Évaluations macroéconomiques dont l'emploi et les investissements

Analyse des changements des modes de vie, menée à travers l'étude qualitative des regards et perceptions de 31 Français d'horizons différents sur les récits des scénarios

Empreinte matière, gaz à effet de serre, ressources et biens de consommation

Usage des terres et qualité des sols

Adaptation au changement climatique

Analyse de l'impact sur quelques filières à enjeux, notamment : « construction neuve », « systèmes énergétiques », « protéines » et « logistique des derniers kilomètres »

Robustesse et vulnérabilité à des chocs

Qualité de l'air

Territoires (sous la forme d'un guide d'aide à la prospective pour les territoires)

Numérique

1

AMBITIONS, CADRAGE DE L'EXERCICE ET CONTEXTE

1. AMBITIONS, OBJECTIFS, MÉTHODES

21 Ambitions et objectifs de l'exercice

26 Méthode de construction et d'analyse des scénarios

42 Références bibliographiques

44 Annexes

MÊME
L'AVENIR
N'EST PLUS CE
QU'IL ÉTAIT.

Paul Valéry

LES ESPÈCES QUI
SURVIVENT NE SONT
PAS LES ESPÈCES LES
PLUS FORTES, NI LES
PLUS INTELLIGENTES,
MAIS CELLES QUI
S'ADAPTENT
LE MIEUX AUX
CHANGEMENTS.

Charles Darwin

Quelques précisions de vocabulaire

Idéologie : prisme cohérent d'interprétation du monde. Ce terme est utilisé dans ce travail sans connotation péjorative : il fait référence aux idéologies pour nourrir et construire les archétypes de scénarios. En situation d'incertitude et de débat sur ce qui est possible et désirable dans le futur, les idéologies jouent un rôle important dans la formation des anticipations des acteurs et leur prise de position pour une orientation stratégique particulière. Un exercice de prospective permet d'expliciter l'état des connaissances et des incertitudes, les positions des acteurs, mais aussi de questionner ces idéologies, les réviser et les confronter.

Récit : descriptif qualitatif et transversal des projections dans le futur. Il s'agit d'un discours décrivant l'évolution en termes qualitatifs et qui expose les caractéristiques, la logique d'ensemble et les éléments nouveaux qui sous-tendent des scénarios du futur. Également appelé « canevas de scénario » dans les textes spécialisés, ces récits permettent de se représenter des futurs et de se projeter mentalement. Ils suscitent une réflexion sur la plausibilité, la faisabilité et la désirabilité de différents futurs.

Scénario : « jeu cohérent d'hypothèses conduisant d'une situation d'origine à une situation future. Un scénario est une description du système à un horizon donné et du cheminement conduisant à son état final. Il peut être vu comme un outil de liaison, qui articule un récit qualitatif à propos du futur et des formulations quantitatives – hypothèses – donnant lieu à modélisation » (définition du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC).
Dans le présent exercice, le terme prend en compte le récit, les hypothèses sur les axes structurants et les simulations quantitatives (modèles mathématiques).

L'AllEnvi [1] nous en donne une définition plus complète encore : c'est « une représentation du futur, basée sur des jeux d'hypothèses et de conséquences ("Si…, alors…"), issue d'une situation initiale et travaillée par des forces et des changements, à un horizon donné » (Alcamo, 2009). Il s'agit en dernier ressort d'« un compromis entre complexité et incertitude, équilibrant approche normative et foisonnement des hypothèses, précision des variables motrices et approximation itérative, expertise des sources et participation ouverte » (Eriksson et Weber, 2008).

Scénarios exploratoires : scénarios explorant le spectre des futurs possibles. Ils se distinguent des « prévisions » réalisées par des prévisionnistes pour qualifier différentes variantes de projections dont les évolutions sont marquées par peu d'incertitudes. Les scénarios exploratoires permettent de réfléchir sur le futur lorsque celui-ci est ouvert, incertain et débattu. Sans pouvoir prédire le futur, la démarche permet néanmoins de restreindre les incertitudes et délimiter le champ du possible et du souhaitable, dont il faudra débattre. Il s'agit donc d'un outil d'aide à la réflexion et à la coordination.

Scénarios normatifs ou stratégiques : scénarios explorant des stratégies possibles pour réaliser des futurs souhaitables et réalisables. Ce sont ces formes de scénarios qui sont réalisées dans le présent projet en considérant des archétypes de stratégies de transformation de la société française qui pourraient permettre de respecter des trajectoires d'émission et d'absorption de gaz à effet de serre. Ces trajectoires doivent être compatibles avec l'objectif français de « neutralité carbone » en 2050 (Loi Énergie-Climat, 2019 [2]).

Variables : éléments qui exercent une influence sur le problème étudié et qui sont susceptibles d'être cause de changement(s). Souvent, une variable dans un système prospectif est un mélange de facteurs et d'acteurs (un facteur évolue le plus souvent sous l'influence d'un acteur ou de plusieurs acteurs). L'ensemble des variables considérées délimite le système de représentation du problème. Leur description est importante, puisqu'il existe de nombreuses incertitudes sur des éléments importants à prendre en compte. Tout récit de scénarios passés, présents et futurs véhicule une simplification nécessaire, mais qui doit être transparente, car elle peut être discutée, jugée plus ou moins pertinente.

Variables clés (*key drivers, shaping actors, shaping factors*) : les variables les plus influentes sur le sujet considéré. L'analyse d'un scénario permet de comparer les ordres de grandeur en jeu, d'analyser et d'expliciter des implications d'évolution de variables, de tirer les enseignements des conditions de cohérence. L'ensemble de cette analyse permet de produire des connaissances utiles pour réduire le champ des possibles et les incertitudes sur le futur.

Variables externes : variables sur lesquelles le système considéré n'a pas ou peu de pouvoir direct. Dans une démarche de prospective stratégique, il est possible de distinguer des variables « de contexte » qui relèvent de l'écosystème dans lequel évolue l'organisation étudiée (l'organisation a un certain pouvoir sur ces variables, mais d'autres acteurs également), de variables « d'environnement » qui relèvent du contexte général (et sur lesquelles l'organisation n'a pas de pouvoir). Dans cet exercice une stratégie nationale climat est envisagée et « l'organisation » rassemble l'ensemble des acteurs et des organisations français. Les variables externes sont, par exemple, l'évolution du contexte international, les marchés et les prix internationaux, l'évolution du climat. Les acteurs français ont une influence, un pouvoir d'action limité sur ces évolutions lorsqu'ils agissent seuls (coordination limitée avec les autres pays). Mais au sein de la stratégie nationale, les divers acteurs auront des champs stratégiques différents.

Variables internes : variables sur lesquelles l'organisation ou l'entité (ici la France) qui conduit la démarche de prospective estime avoir une certaine maîtrise et sur lesquelles elle peut jouer pour déployer sa stratégie. Dans cet exercice de prospective, les variables internes correspondent d'abord aux variables sur lesquelles les stratégies des acteurs des secteurs techniques ont une influence (dans le bâtiment, les transports, l'industrie, l'agriculture, la production d'énergie, etc.).

1. Ambitions et objectifs de l'exercice

1.1. Pourquoi mettre en débat la stratégie de transition écologique ?

En ligne avec ses engagements internationaux de l'Accord de Paris (2015), la France a construit deux premières Stratégies Nationales Bas Carbone (SNBC, 2015 [3] ; 2020 [4]), qui ont permis de fixer les grands objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), ainsi que les budgets carbone[1] qu'elle doit respecter pour les années à venir. Selon la Loi Énergie-Climat (2019) [2], **la trajectoire de réduction et d'absorption des GES doit permettre d'atteindre un objectif de « neutralité carbone » d'ici 2050, soit un équilibre entre des flux annuels d'émissions et des flux d'absorption.** Arriver à cette trajectoire constitue un réel défi. Le Haut Conseil pour le Climat, chargé de suivre la mise en œuvre de la politique climatique de la France, a ainsi constaté en 2020 que « la réduction des émissions de gaz à effet de serre continue à être trop lente et insuffisante pour permettre d'atteindre les budgets carbone actuels et futurs » [5] [6].

Pour les prochaines années, **le rythme annuel de réduction des émissions françaises doit donc fortement s'accélérer pour respecter les budgets carbone de la deuxième SNBC** [4]. Si la crise de la Covid-19 a marqué une rupture ponctuelle en faisant de 2020 une année record de baisse, le rebond des émissions est déjà constaté. Par ailleurs, cette baisse conjoncturelle est de toute façon insuffisante à long terme et s'est faite au prix d'une crise économique sans précédent.

Les décennies à venir seront marquées par d'indispensables transformations, rapides, profondes et systémiques pour diminuer drastiquement l'impact des activités humaines non seulement sur le climat (voir en particulier le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [GIEC] d'août 2021 qui le rappelle [7]), mais également sur la biodiversité et les pollutions. Elle suppose, dans les deux décennies à venir, une mobilisation sans précédent de tous les acteurs de la société, d'importantes innovations techniques, institutionnelles et sociales, ainsi qu'une évolution profonde des modes de vie, de production et de consommation. **C'est à ce point charnière du temps que ce travail se situe, en amont des délibérations collectives sur la future Stratégie Française Énergie-Climat (SFEC)et à la veille des débats de l'élection présidentielle de 2022** au cours de laquelle, sur la question de la transition écologique, des propositions concrètes à la hauteur des enjeux devront émerger.

L'objectif de cet exercice de scénarisation de l'ADEME n'est pas de proposer un projet politique, ni « la » bonne trajectoire pour parvenir à ces objectifs collectifs. Ne serait-ce que parce que les incertitudes sont telles qu'aucun expert ne peut prétendre identifier la meilleure trajectoire, ni aucun politique ne peut affirmer que son programme d'action permettra de réaliser effectivement la trajectoire prévue. Mais l'expertise peut **contribuer à rassembler des éléments de connaissances techniques, tout en favorisant des débats nourris de ces connaissances, sur ce qui est possible et souhaitable.** Les décisions collectives doivent en effet porter autant sur la société durable que nous souhaitons construire ensemble que sur les modalités de réalisation de transformations profondes et systémiques qui la rendront possible. **L'ADEME propose ici quelques archétypes de scénarios. Ils ne sont pas les seuls possibles, ils sont complémentaires plus que concurrents avec ceux proposés par d'autres acteurs.** Leur but est d'aider à réfléchir à la nature des transformations et des choix à faire pour construire un chemin de développement compatible avec un objectif de neutralité carbone, aider également à prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qui entraîneront des chemins différents. Il s'agit également de **fournir des éléments d'évaluation sur les enjeux sociaux, économiques, environnementaux associés à ces différents chemins, afin de nourrir les délibérations sur une stratégie de compromis qui emportera l'adhésion.**

En plus de la question climatique et de l'urgence à laquelle il convient aujourd'hui de faire face, d'autres enjeux environnementaux sont plus pressants que jamais : la qualité et la disponibilité de la ressource en eau, la destruction et la perte de qualité des sols, la destruction de la biodiversité, etc. **Le choix de la**

1 Ce sont des plafonds d'émissions à ne pas dépasser, exprimés en moyenne annuelle par période de 5 ans en millions de tonnes de CO_2 équivalent.

stratégie de développement française devra être justifiée au regard de l'ensemble des enjeux écologiques, sociaux et économiques et se fixer des objectifs quantitatifs pour chacun d'eux. La Commission de l'environnement, de la santé et de la sécurité alimentaire du Parlement européen propose par exemple de définir un objectif de diminution de consommation de matières premières. Sans fixer de chiffre, le Parlement fait référence au plan néerlandais de 2016 qui fixe un objectif de moins 50 % de matières premières à l'horizon 2030 (en fait de métaux, minéraux non métalliques et énergies fossiles [8]). Ce n'est, à ce stade, qu'une proposition de la commission du Parlement mais le fait de rendre ces objectifs contraignants ou engageants commence à faire son chemin.

Pour atteindre l'objectif d'un débat public de qualité, il faut aussi que la transparence sur la démarche, les hypothèses et les résultats soit la plus grande possible. Un exercice qui renforcerait la défiance serait contre-productif. Un scénario unique serait trop perçu comme la sélection et la justification d'une position partisane parmi d'autres défendables et non pas comme une analyse utile pour nourrir des délibérations où toute position réaliste est défendable. La première mesure consiste à ne pas retenir *a priori* un seul scénario normatif plausible mais plutôt **plusieurs scénarios alternatifs, pour susciter une confrontation argumentée entre des conceptions concurrentes sur la bonne stratégie.** Une seconde mesure consiste à expliciter la méthode, les hypothèses, les résultats, donner accès aux sources et aux données, rendre disponible les analyses pour les réexaminer, les approfondir, les discuter. Ce travail de transparence, de dialogue et d'approfondissement devra se poursuivra au-delà de cette publication.

1.2. Préciser les moyens de réaliser une transition écologique profonde

L'atteinte des objectifs d'une transition écologique suppose donc des transformations importantes, systémiques et profondes. Le philosophe Pascal Chabot [9] remarque que la discussion sur la transition évolue pour se concentrer sur les moyens sans remettre en cause les objectifs : « La transition voudrait avant tout changer les moyens de parvenir à des fins. » Ceci s'applique aujourd'hui aux enjeux de la transition écologique. La neutralité carbone et la protection de la biodiversité constituent des objectifs partagés par une majorité de personnes. **Mais les désaccords demeurent sur les moyens à mobiliser pour atteindre ces objectifs, ainsi que sur la façon de concilier des défis écologiques, économiques et sociaux simultanés.**

Avec ce travail de scénarisation, l'ADEME souhaite nourrir ces débats sur les moyens et les conditions de réalisation de trajectoires compatibles avec l'objectif de neutralité carbone. Il s'agit de développer la discussion sur la faisabilité de chemins alternatifs compatibles avec cette cible et sur leurs conséquences écologiques, économiques et sociales. Il s'agit au final de favoriser les délibérations nécessaires pour identifier une stratégie de développement désirable, susceptible d'emporter une large adhésion.

1.3. Des contributions importantes au-delà des scénarios produits

Au-delà des résultats particuliers obtenus, les contributions de ce projet visent d'autres objectifs :

- contribuer à la capitalisation et à la mise en cohérence de connaissances récentes ; notamment identifier des potentiels, trouver des convergences d'intérêts parfois, mais aussi identifier les arbitrages nécessaires dans les années à venir pour concilier les enjeux écologiques et sociétaux ;
- identifier des points aveugles de connaissance qui semblent prioritaires pour la délibération, la décision et l'action, en posant ainsi des questions nouvelles pour les recherches à venir ;
- construire une prospective servant d'outil d'aide à la décision, de médiation et de dialogue, à destination des nombreuses sphères scientifiques et expertes concernées en mettant à disposition des analyses, des hypothèses et des résultats qui pourront être appréhendés dans l'espace public, examinés, discutés et approfondis par de nombreux travaux à venir ;

- **faire dialoguer et délibérer différentes communautés et parties prenantes** sur les décisions autour des transformations structurelles à réaliser, en examinant les options alternatives et les stratégies des acteurs des différentes filières, qui contribueront à l'atteinte de la neutralité carbone ;

- **nourrir le débat public et politique** qui s'ouvrira notamment dans les perspectives électorales de l'élection présidentielle de 2022 et au-delà, dans le cadre des discussions sur la Stratégie Française Énergie-Climat (SFEC) et des débats nationaux ou locaux qui pourront être organisés par les autorités publiques.

1.4. Continuité et innovation par rapport aux prospectives précédentes

Le concept de neutralité carbone, extrêmement ambitieux et structurant depuis l'Accord de Paris de 2015, rend les outils d'analyse numérique non pas obsolètes, mais parfois en limite de validité ou de pertinence. Il existe **un processus d'amélioration continue des approches, modèles d'analyse et connaissances permettant de renseigner utilement les acteurs et les processus de décision.** L'exercice de scénarisation de l'ADEME s'inscrit dans cette dynamique.

Pour cet exercice, l'ADEME a fait plusieurs choix méthodologiques structurants :

- **la prise en compte de « récits nationaux pour la transition »**, pour considérer des alternatives traitant des intérêts divergents d'acteurs, le tout dans un contexte d'incertitudes fortes ;

- **une modélisation et une représentation conjointe des objectifs de transition énergétique** et des politiques d'économie des ressources naturelles poursuivies dans le cadre des objectifs de développement durable (ODD) ;

- **un cadre d'analyse commun** pour décrire diverses trajectoires faisant apparaître les principales variables stratégiques et les leviers de transitions ;

- une approche, non pas en extrapolation et inflexion des tendances, mais en **rétroprojection partant de l'objectif de long terme** (ici la neutralité carbone) et analysant les chemins permettant d'y aboutir à partir de la situation initiale. Cette approche nécessite une démarche itérative entre objectifs de long terme et évolutions et actions de court terme.

Par ailleurs, l'exercice intègre également des avancées analytiques dans un certain nombre de domaines jusque-là peu ou mal étudiés dans les prospectives du climat, comme l'évaluation de la disponibilité et des choix d'usage de la biomasse, l'évolution des puits biologiques et techniques permettant d'absorber des gaz à effet de serre, l'évolution des quantités de production industrielle induites par les évolutions de la consommation, la description de la transformation des filières et des modes de vie, l'évaluation de l'empreinte de la consommation des Français en ressources physiques et gaz à effet serre, la robustesse à des incertitudes macroéconomiques. Tout ceci contribue à repousser les limites d'analyse constatées dans les exercices de scénarisations précédents (« Visions » ADEME [10] [11] ; SNBC 2015 [3], 2020 [4], etc.). Ce travail d'amélioration des méthodes et des connaissances se poursuit au long cours. Ainsi, chaque chapitre souligne les limites de l'analyse et donnent des perspectives d'approfondissement des connaissances pour les années à venir.

1.5. Des scénarios pour délibérer sur la stratégie de transition écologique

Les quatre scénarios sont des « archétypes » de stratégies et sont très ouverts. Ils permettent de dresser une cartographie cohérente et aussi complète que possible des grands choix stratégiques qui s'offrent à nous. Ces quatre archétypes ne couvrent pas tous les scénarios possibles. D'autres acteurs pourront proposer d'autres scénarios qui pourront y être comparés. **Il s'agit néanmoins de scénarios contrastés, qui permettent de réfléchir collectivement aux alternatives possibles**, à ce qui semble plus réaliste, plus désirable, ainsi qu'aux conditions nécessaires pour parcourir le chemin vers une neutralité carbone.

D'autres travaux de prospective, comme le rapport Vigie 2020 [12] de Futuribles qui envisage seize scénarios de rupture, ou le Global Trend 2040 de la CIA [13] qui donne une vision américaine des grandes tendances politiques, militaires, économiques et sociales du monde, sont des exercices complémentaires, puisqu'ils envisagent des ruptures possibles, rappellent des tendances de fond structurantes pour la société française et le monde dans les années à venir. Les scénarios de transition de l'ADEME ne décrivent pas l'ensemble de ces tendances, puisqu'ils se concentrent avant tout sur les transformations physiques qui affecteront l'atteinte des objectifs écologiques. Toutefois, **une discussion plus « sociétale » pourra être suscitée par les scénarios ADEME grâce à une mise en regard des chemins de transformations écologiques décrits avec ces considérations plus larges sur les grandes tendances et ruptures de l'état du monde.** Ces évolutions sont susceptibles d'affecter significativement la transition écologique à opérer. Néanmoins, nous n'analysons pas ici les relations entre ces travaux de prospective. Les scénarios proposés couvrent un champ

large, mais limité à la stratégie nationale de transition écologique d'un pays (la France) vers la cible particulière de neutralité carbone et à ce titre l'analyse ne décrit pas l'ensemble des évolutions du monde.

Le lecteur des scénarios ADEME pourra cependant garder en tête l'existence de tendances observées au cours des trente dernières années et questionner les interactions possibles de dynamiques sociétales à l'œuvre avec les enjeux de la transition écologique des trente prochaines années :

- augmentation de l'espérance de vie (+6 ans en 30 ans);
- augmentation de la population mondiale (+2,3 milliards en 30 ans);
- population urbaine devenue majoritaire (plus des ¾ de la population des pays industrialisés);
- place croissante des femmes dans la société;
- découverte et confirmation des dégâts environnementaux (climat, ressources et biodiversité avec notamment le GIEC, l'IRP et l'IPBES);
- la révolution numérique et d'Internet (du smartphone à l'intelligence artificielle);
- la mondialisation et plus particulièrement la montée en puissance de la Chine comme acteur économique majeur aux côtés des États-Unis;
- le regain du fondamentalisme religieux et du terrorisme;
- le multilatéralisme géopolitique et l'affaiblissement de la coopération internationale;
- etc.

Enfin, **ce travail de scénarisation est publié dans une période très particulière, marquée par la crise de la Covid-19. Cette période affecte les imaginaires comme les certitudes sur la prolongation des grandes tendances du passé, les possibilités de rupture, les possibilités d'action et l'évolution des valeurs collectives.** On discute pour savoir si le « monde d'après » ressemblera au « monde d'hier ». Cette possibilité de rupture n'est pas non plus prise en compte dans la construction des scénarios de neutralité carbone. En effet, elle ne change pas la vision des transformations physiques de long terme qui seront nécessaires pour réduire les émissions et absorber les gaz à effet de serre. On gardera néanmoins cette réflexion en toile de fond pour se demander si les évolutions de long terme décrites se trouvent freinées ou favorisées par ce contexte (par exemple, l'augmentation du télétravail qui affectera les déplacements et les émissions des transports), si ce contexte change l'appréciation d'une stratégie par rapport à une autre (par exemple, parce qu'elle accélère certaines réévaluations et prises de conscience sur des changements qui sont davantage perçus comme faisables et désirables après la pandémie). En fait, cette réflexion accompagne bien plus la lecture que la construction des scénarios.

Il reste la question épineuse des incertitudes et de la robustesse des stratégies décrites à des évolutions imprévues. Il s'agit également d'un enseignement de la pandémie et l'on sait que les chocs à venir liés à l'évolution du climat seront importants. Des chocs sur l'environnement technique, économique, social, politique et mondial arriveront certainement. La réalisation de ces scénarios de neutralité carbone ne sera certes pas un long fleuve tranquille. Il demandera des tâtonnements, des réactions, des ajustements au fil de l'eau qui seront cruciaux dans les deux prochaines décennies. Les scénarios proposés restent néanmoins dans une grande mesure déterministes. Ils sont fondés sur des hypothèses particulières sans analyser tout le champ des incertitudes possibles. Mais ils pourront **servir de base à des réflexions et des analyses sur les effets de chocs et d'incertitudes sur les évolutions du monde.** Pour cette raison, la description transparente et la plus complète possible des hypothèses et de la méthode est importante puisque la description des effets et la comparaison des stratégies décrites en découle. Cette description transparente permettra l'utilisation de ces scénarios pour la délibération et la poursuite de l'analyse[2] : « Et si je suppose autre chose, est-ce-que cela change le choix ou l'évaluation de ce qu'il faut faire ? »

1.6. Vers une évaluation multicritère des scénarios de transition écologique

Le choix de la stratégie française de développement pour le XXIe siècle doit également assurer un niveau de conciliation suffisant entre plusieurs objectifs auxquels la France doit s'atteler simultanément. L'objectif de neutralité carbone que **les scénarios ADEME** tentent d'expliciter ne peut être isolé de ces autres objectifs simultanés puisqu'il **suppose des transformations profondes et systémiques des modes de production, de consommation, d'aménagement du territoire, qui auront des effets dans bien d'autres dimensions que les émissions de gaz à effet de serre.**

Le *Graphique 1* synthétise quelques enjeux soulevés par les différents avis exprimés sur le projet de SNBC 2 [4] par différentes instances consultatives et

2 La robustesse des stratégies à différents contextes macroéconomiques est examinée par le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), en prenant en compte des incertitudes sur le fonctionnement de l'économie et le contexte futur : le prix du pétrole importé, la concurrence étrangère, le fonctionnement du marché du travail, etc. Ce travail d'analyse complémentaire sera publié en 2022.

compétentes : le Conseil national de la transition écologique (CNTE), le Conseil économique, social et environnemental (CESE), l'Autorité environnementale (AE), etc. À côté des questions techniques et technologiques, tous ces avis soulignent l'importance des transformations économiques, sociales, voire sociétales, qu'impliquent le déclenchement et la réussite d'une trajectoire de neutralité carbone.

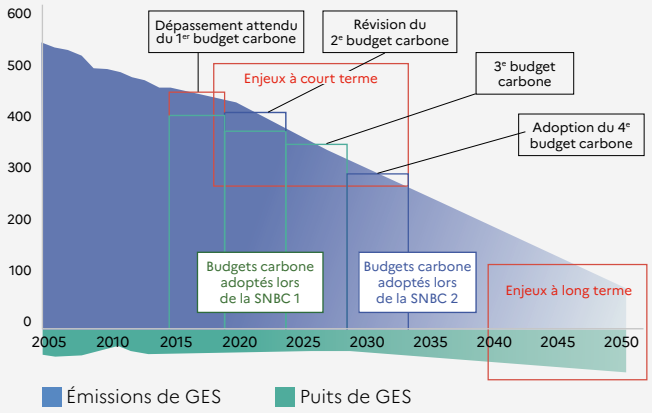
Une planification et un pilotage collectif de ces transformations supposent donc une capacité d'innovation institutionnelle et démocratique pour faire des choix et arbitrages collectifs nombreux, qui tiennent compte de diverses conséquences économiques, écologiques et sociales des projets. La conciliation de différents objectifs et la réalisation des arbitrages en favorisant une large adhésion à la stratégie se sont en effet avérées problématiques, avec des oppositions comme celles du mouvement des Gilets jaunes. **Pour préparer les délibérations nécessaires, identifier des voies de conciliation et de compromis, effectuer des arbitrages largement soutenus et partagés, des évaluations sont nécessaires pour produire des indicateurs complémentaires** aux indicateurs sur l'énergie et les gaz à effet de serre.

Pour ces raisons, **des évaluations sont réalisées pour compléter l'examen et la comparaison des scénarios** par des indicateurs de différentes natures. Ces évaluations complémentaires seront publiées progressivement à partir des scénarios techniques construits et présentés ici. Les indicateurs permettent d'expliciter la nature des changements induits par la stratégie dans les différents domaines et de se poser la question des moyens pour y parvenir, si ces changements sont faisables, s'ils sont souhaitables et dans quelles conditions. **Néanmoins les scénarios ont été construits uniquement pour atteindre la cible de neutralité carbone.** Cela signifie que les indicateurs complémentaires mesurés dans les dimensions non climatiques (qualité de l'air, autres ressources, économiques, sociales, etc.) ne servent pas à définir d'autres cibles, mais à qualifier les conséquences possibles des scénarios dans d'autres dimensions que l'énergie et le climat qui contribuent au choix.

Parmi ces indicateurs, il était prévu d'analyser les impacts sur la biodiversité des différents scénarios avec l'Office Français de la Biodiversité (OFB). Malheureusement, il n'a pas été possible de le faire dans des conditions optimales en raison de difficultés de diverses natures liées principalement aux connaissances actuelles sur la biodiversité et aux limites de l'évaluation (notamment au fait que les données ne sont pas localisées précisément). Pour autant, l'enjeu de la préservation de la biodiversité n'est pas absent des travaux. Son évaluation quantitative fera l'objet de développements ultérieurs.

Graphique 1 *Enjeux de la trajectoire des émissions de GES en France à l'horizon 2050 et budgets carbone de la SNBC*

Enjeux à court terme
- Conditions économiques et sociales (investissements, prix, répartition des efforts) ;
- Coordination et alignement des diverses stratégies d'acteurs ;
- Conditions d'amélioration massive de l'efficacité énergétique des bâtiments et systèmes de chauffage ;
- Rupture de la dynamique de croissance des transports individuels et usages des carburants fossiles ;
- Compétences et métiers, dispositif d'accompagnement des activités « perdantes » ;
- Cohérence des orientations d'innovation technologiques et des stratégies de filières ;
- Bonne gestion et cohérence des dynamiques d'évolution des réseaux et filières énergétiques.



Des enjeux bien au-delà de l'énergie et du climat, de très nombreuses décisions publiques et privées, certaines à court terme, d'autres à plus long terme.

Enjeux à plus long terme
- Saturation des gains technologiques et des gains d'efficacité énergétique ;
- Enjeux des contraintes physiques en autres ressources (sols, bioressources, minéraux, eau, etc.) ;
- Modalités de transport longue distance ;
- Enjeux de la flexibilité du mode de développement à la diversité des sources d'énergie et des usages ;
- Enjeux de l'évolution des modes de vie, sobriété, consommation, déplacements… ;
- Évolution plus profonde des modes de production, de consommation, de localisation, d'échange ;
- Absorption et stockage des GES.

Source : [14].

2. Méthode de construction et d'analyse des scénarios

2.1. L'approche et les scénarios du GIEC comme inspiration

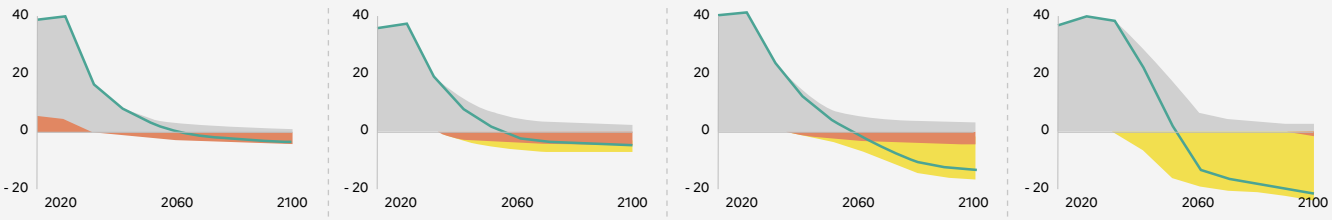
Afin de construire plusieurs scénarios en vue d'un même objectif, ceux de l'ADEME s'inspirent de la méthode et des quatre grandes familles de scénarios du rapport spécial 1,5 °C du GIEC [15]. Ces quatre familles offrent des visions alternatives de chemins vers un objectif climatique ambitieux.

Les quatre familles de scénarios du rapport 1,5 °C du GIEC (P1 à P4) sont issus des *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP)[3] les plus contrastés (SSP1 pour P2, SSP2 pour P3 et SSP5 pour P4) et d'un scénario construit *a posteriori* (LED[4] pour P1), afin de représenter un univers dans lequel les efforts de maîtrise de la demande et de la consommation sont plus systématiques. L'articulation entre les récits et les résultats quantitatifs des modélisations est illustrée par le ***Graphique 2***. On y trouve les narratifs succincts ainsi que les trajectoires quantifiées d'émissions et de stockage du carbone.

Graphique 2 *Détail des contributions aux émissions nettes mondiales pour quatre exemples de trajectoires modélisées par le GIEC*

Combustibles fossiles et industrie
AFAUT* (agriculture, foresterie et autres utilisations des terres)
BECSC** (bioénergie avec captage et stockage du carbone)

Milliards de tonnes de CO_2 par an ($GtCO_2$/an)



P1
Scénario selon lequel les innovations sociales, commerciales et technologiques engendrent une réduction de la demande d'énergie jusqu'en 2050 alors que les conditions de vie s'améliorent, en particulier dans l'hémisphère Sud. Un système énergétique de moindre envergure permet une décarbonisation rapide de l'énergie fournie. Le boisement est la seule option d'absorption du carbone retenue ; il n'est pas fait recours aux combustibles fossiles avec captage et stockage du dioxyde de carbone (CSC) ni à la BECSC.

P2
Scénario qui met beaucoup l'accent sur la durabilité, y compris l'intensité énergétique, le développement humain, la convergence économique et la coopération internationale, ainsi qu'une réorientation vers des modes de consommation durables et robustes, des innovations technologiques à faible intensité de carbone et des systèmes d'utilisation des terres bien gérés, avec une acceptabilité sociétale limitée pour ce qui est de la BECSC.

P3
Scénario intermédiaire selon lequel le développement sociétal comme le développement technologique suivent des schémas habituels. La réduction des émissions s'obtient principalement par une modification de la façon dont l'énergie et les produits sont obtenus et, dans une moindre mesure, par une réduction de la demande.

P4
Scénario à forte intensité de ressources et d'énergie selon lequel la croissance économique et la mondialisation aboutissent à l'adoption à grande échelle de modes de vie à forte intensité de GES, y compris une forte demande de carburants et de produits de l'élevage. La réduction des émissions s'obtient principalement par des moyens technologiques qui font un usage intensif de l'absorption du carbone au moyen de la BECSC.

* AFAUT : bilan d'émission de l'agriculture, de la foresterie et des autres utilisations des terres (positif ou négatif).
** BECSC : absorptions de gaz permises par le développement de bioénergie avec captage et stockage du carbone.

Source : [15].

3 Scénarios d'évolutions socio-économiques mondiales projetés jusqu'en 2100 et utilisés comme base de référence pour la rédaction du sixième rapport d'évaluation du GIEC sur le réchauffement climatique. Ils fournissent des récits qui décrivent qualitativement les différents types de développements socio-économiques reliant les éléments des récits les uns aux autres.
4 IASA, *Low energy demand Database*, https://db1.ene.iiasa.ac.at/LEDDB/dsd?Action=htmlpage&page=10#intro.

Ces grands récits offrent un premier niveau de cohérence et de description pour des familles de scénarios qu'il convient ensuite de nourrir et d'expliciter, en formulant des hypothèses et en produisant des évaluations.

C'est cette approche générale et la philosophie des quatre archétypes de scénarios qui ont été retenues pour construire les quatre scénarios de l'ADEME. Le détail des éléments décrits, des hypothèses, des méthodes de modélisation sont néanmoins adaptés au contexte français et aux expertises de l'ADEME. En particulier, la cible de stabilisation de la hausse des températures mondiales à +1,5 °C n'est pas conservée comme élément de cadrage pour l'adaptation au changement climatique, puisque l'atteinte de cette cible reste une hypothèse trop optimiste et suppose un niveau d'effort collectif au niveau mondial que les contributions nationales annoncées (*Nationally Determined Contribution*, NDC) laissent peu présager.

2.2. Les cinq scénarios de l'ADEME et la « neutralité carbone »

UN SCÉNARIO TENDANCIEL ET QUATRE SCÉNARIOS DE NEUTRALITÉ CARBONE

Les quatre scénarios de neutralité carbone (NC) sont inspirés des scénarios du GIEC (P1 à P4 du rapport 1,5 °C). Ils se distinguent par leur ambition d'un scénario de prolongation des tendances (TEND) dans lequel l'absence de ruptures rend le chemin de développement incompatible avec la neutralité carbone.

Le scénario tendanciel (TEND) est construit en prolongeant les dynamiques de long terme observées dans le passé tout en tenant compte de seuils (par exemple, la saturation d'un marché d'équipements). Une forte probabilité est souvent associée à ce type de scénario, ce qu'il convient de nuancer. En effet, s'il n'envisage pas de fortes ruptures, il peut révéler l'insoutenabilité de certaines tendances. Ne pas agir pour infléchir les tendances historiques pourra donc mener à des ruptures brutales. En ce sens, le scénario de prolongation des tendances ne permet pas de juger pleinement des conséquences de l'inaction. Mais il est très utile pour mesurer les risques d'un écart à l'objectif et les efforts à faire dans différents domaines pour limiter ces risques. **Il permet de situer le chemin que nous risquons de suivre si aucune modification, spontanée ou non, des tendances observées ne se produit.**

Les quatre scénarios NC sont construits de façon à s'approcher d'une cible de neutralité carbone en 2050. Cette cible, formulée dans l'accord de Paris pour que le monde l'atteigne dans la seconde moitié du XXIe siècle, n'a de sens pour le climat qu'au niveau de la planète. Au niveau des états, sa mesure pour guider l'ambition de stratégie nationale reste conventionnelle. Nous reprenons donc la traduction qui est en faite dans la Loi Énergie-Climat de 2019 [2]. Cette traduction vise, à l'horizon 2050, des émissions annuelles nettes au moins nulles sur le territoire français (selon la convention d'inventaires d'émissions de l'UNFCCC[5]), ce qui suppose que les émissions résiduelles de l'année 2050 soient au moins compensées par un flux égal d'absorption des gaz à effet de serre. Néanmoins, la trajectoire compte pour juger de la contribution française au stock des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Nous donnerons une estimation du flux total des émissions nettes d'ici à cet horizon, sans pour autant utiliser cette mesure comme cible (*cf.* chapitre ***3.1. Synoptique des résultats et comparaison des scénarios***). Nous donnerons également dans une évaluation future une estimation des émissions de la consommation des Français (leur empreinte écologique), qui mesure l'impact du mode de vie français au-delà des seules émissions territoriales. En effet, l'empreinte ajoute les émissions issues de territoires étrangers mais qui servent à la production des produits importés en France et soustrait les émissions territoriales des exportations.

Les scénarios de neutralité carbone sont normatifs au sens où ils sont construits par itération en ajustant les hypothèses de transformations jusqu'à atteindre la cible. Ils ne sont pas pour autant prescriptifs *a priori*, parce qu'il faut une discussion sur leur comparaison pour trancher et parce qu'étant donné les fortes incertitudes du futur, il peut exister différents points de vue sur ce qui est faisable et désirable. Néanmoins, l'état des connaissances et les contraintes de cohérence de l'analyse permettent de réduire le champ des possibles et de donner des arguments en faveur d'une stratégie par rapport à une autre.

POSITIONNEMENT PAR RAPPORT À LA SNBC ET À LA PROGRAMMATION PLURIANNUELLE DE L'ÉNERGIE (PPE)

Les documents officiels de la SNBC 2 [4] décrivent deux scénarios qu'il convient de positionner par rapport aux cinq scénarios précédents.

5 *United Nations Framework Convention on Climate Change.*

Le scénario « avec mesures existantes » (AME) est interprété comme un scénario tendanciel, mais il doit être distingué du scénario ADEME de prolongation des tendances passées (TEND). Le scénario AME a été mis à jour et publié en juillet 2021 pour répondre aux obligations de la France de rapportage européen. Le scénario AME évalue l'effet des mesures votées jusqu'au 31 décembre 2019 en simulant leur efficacité attendue pour réduire les émissions. Il reflète l'anticipation des autorités françaises sur les effets des politiques et mesures décidées et permet de mesurer, par comparaison, l'écart avec les objectifs, et renforcer, si besoin, les politiques. Il ne s'avère pas compatible avec les objectifs français et européens.

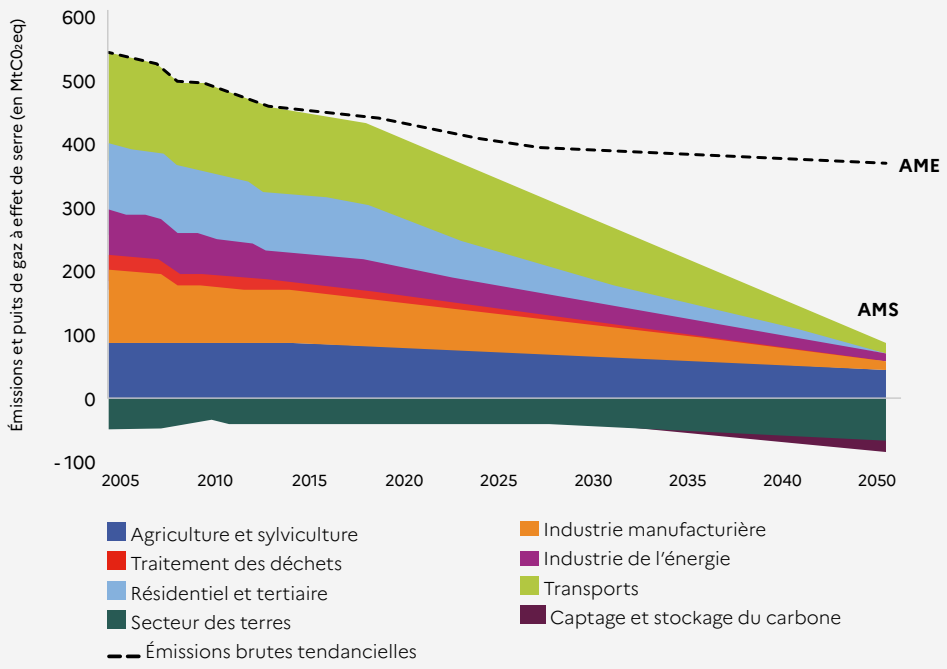
Contrairement au scénario AME, le scénario tendanciel ne suppose pas *a priori* que les politiques votées qui n'ont pas encore été déployées apportent les effets escomptés.

Le scénario tendanciel suppose néanmoins que les plans d'investissement et programmes qui sont en cours de déploiement auront des effets sur les émissions : par exemple, l'application de la loi de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), les Programmes d'Investissements d'Avenir (PIA) successifs, etc. La description des tendances et plans pris en compte dans le scénario tendanciel sont décrits dans la *Partie 2*. Le scénario tendanciel a été construit avant la mise en œuvre du Plan de Relance de la crise de la Covid-19. Il serait possible d'évaluer dans un second temps à quelle hauteur ce plan contribue à nous rapprocher des trajectoires des scénarios de neutralité carbone.

Tout comme le scénario AME, le scénario tendanciel ne permet pas d'atteindre des objectifs de réduction de GES, de consommation d'énergie finale et de consommation d'énergie fossile compatibles avec l'objectif de neutralité carbone.

Le scénario « avec mesures supplémentaires » (AMS) est le scénario de référence de la stratégie nationale adoptée par la France (SNBC). Il « prend en compte des mesures de politiques publiques, en supplément de celles existant aujourd'hui, qui permettraient à la France de respecter ses objectifs climatiques et énergétiques à court, moyen et long terme. Il dessine une trajectoire possible de réduction des émissions de gaz à effet de serre jusqu'à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, à partir de laquelle sont définis les budgets carbone ». Il correspond à la vision du chemin vers la neutralité carbone qui est la référence stratégique des politiques publiques à déployer dans le cadre de la gouvernance française de l'énergie et du climat *(Graphique 3)*.

Graphique 3 Les trajectoires des scénarios AME et AMS de la SNBC 2



Note de lecture : les deux scénarios divergent à partir de 2015 en raison des effets attendus de la mise en place de politiques et mesures supplémentaires (orientations de la Stratégie Nationale Bas Carbone).
Selon le scénario AMS, la stratégie permet des émissions inférieures de 83 % au scénario AME en 2050 (réduction additionnelle à l'effet des politiques et mesures déjà mises en place ou votées).

Source : [4].

Le scénario AMS est un scénario stratégique de neutralité carbone comme les quatre scénarios NC ADEME. Il pourra être comparé à ces derniers et d'autres disponibles dans le cadre des décisions à venir sur la troisième SNBC. Ces scénarios pourront aussi être comparés aux objectifs du paquet « Fit for 55 % » en discussion au niveau européen, qui vise à renforcer l'action des États pour atteindre une réduction de 55 % des émissions de gaz à effet de serre de l'Union européenne par rapport à 1990 (la cible était auparavant de - 40 %). L'objectif collectif sera ensuite de parvenir à un scénario d'arbitrage, suscitant une large adhésion, au terme du processus d'élaboration, de débat et d'adoption de la Stratégie Française Énergie-Climat et de la SNBC 3. Le nouvel AMS reflétera alors la stratégie officielle de la France et fera référence à partir de 2023 pour les politiques publiques. Les chapitres d'analyse sectorielle *(Partie 2)* et de synthèse des résultats *(Partie 3)* comparent les résultats des scénarios NC avec le scénario AMS de la SNBC 2.

POINTS DE « PASSAGE OBLIGÉ » ET ALTERNATIVES STRATÉGIQUES

Tout comme le scénario tendanciel, les quatre scénarios NC considèrent les objectifs ou engagements pris jusqu'en 2028 comme actés, dès lors que des mesures et moyens concrets y sont associés. **Pour les politiques et mesures auxquelles ne sont pas associés de moyens adéquats, les scénarios peuvent supposer ou non qu'elles sont mises en œuvre, selon la stratégie retenue dans chaque scénario.** Par exemple, l'objectif de renforcer la valeur du carbone prise en compte par tous les acteurs de l'économie dans leurs décisions d'investissement, de production et de consommation est l'une des orientations stratégiques des SNBC et de la PPE 2, mais qui ne se concrétise pas encore par la mise en œuvre de politiques et mesures suffisantes.

La PPE mise au débat en février 2020 énonçait déjà ce décalage entre objectifs et moyens. « Les mesures détaillées explicitement dans ce document devront être complétées par des mesures supplémentaires pour atteindre l'ensemble des objectifs à l'horizon 2030 » ([16], page 20). Les rapports du Haut Conseil pour le Climat ont également identifié ce décalage [5] et [6], ainsi que récemment le Conseil d'État [17].

Selon les scénarios, certaines politiques, mesures et orientations stratégiques qui sont ou ont été envisagées peuvent être écartées si elles semblent incompatibles ou incohérentes avec la logique des récits, ce qui permet d'examiner quelles contreparties ou alternatives stratégiques seraient réalisées dans chaque scénario pour atteindre les objectifs. Par exemple, une mobilisation moins importante de biomasse-énergie peut impliquer une électrification plus grande, des installations différentes de production d'énergie ou des mesures d'économie d'énergie, de sobriété, ou encore un renouvellement plus rapide des équipements utilisateurs d'énergie pour améliorer l'efficacité des usages.

LA CIBLE DE NEUTRALITÉ CLIMATIQUE

La cible de neutralité carbone se traduit par un équilibre entre les gaz à effet de serre émis chaque année et la quantité de CO_2 absorbée par les « puits de carbone » sur un territoire national. Ces puits peuvent être naturels (forêts et sols) ou technologiques (captage et séquestration du carbone sur des sites industriels ou diffus en puisant le carbone dans l'air). Actuellement les émissions totales en France sont de l'ordre de 436 $MtCO_2eq$/an (2019). Les puits français (exclusivement naturels, sols et forêts jusqu'à 2020) sont d'environ 30 $MtCO_2eq$/an. L'atteinte de la cible implique donc de réduire les émissions annuelles de 406 $MtCO_2$/an tout en maintenant le niveau de puits de carbone actuel ou bien d'être en mesure d'augmenter la capacité de ces puits pour disposer d'un budget d'émissions résiduelles plus important.

La Loi Énergie-Climat [2] a inscrit l'objectif de diviser au moins par six les émissions brutes de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 par rapport à 1990, ce qui suppose également d'être en mesure de pratiquement doubler, dans le même temps, la capacité des puits avec des implications pour la programmation énergétique des dix prochaines années, la PPE [16]. En 2020, cette programmation a été construite en cohérence avec les orientations à plus long terme de la SNBC, à savoir l'enjeu de décarboner totalement le secteur de l'énergie d'ici à 2050, en substituant aux énergies fossiles des énergies n'émettant pas de gaz à effet de serre, et en développant les puits de carbone pour compenser les émissions inévitables. Il existe néanmoins d'autres émissions de gaz à effet de serre non liées à la production d'énergie qu'il convient également de compenser. Enfin, la SNBC 2 [4] évalue les besoins énergétiques de la moitié des consommations du transport international (trajets d'avions ou de bateaux vers l'étranger), mais pas les émissions associées.

L'atteinte de la cible de neutralité carbone est donc très ambitieuse mais offre aussi des marges de manœuvre pour définir des stratégies et des transformations différentes du mode de développement français. **Chacun des quatre scénarios ADEME explore des transformations différentes qui ont un effet sur la nature et le niveau des réductions d'émissions, les émissions résiduelles et l'évolution des puits de carbone.** Ils explorent donc des alternatives stratégiques sur la nature et le contenu de la transition écologique en vue d'atteindre un même niveau de contribution à l'évolution du climat.

C'est donc la définition théorique d'émissions nettes nulles ou négatives (objectif *Net Zero*) qui est retenue comme cible pour les quatre scénarios NC, plutôt que l'orientation politique envisagée aujourd'hui (une division par six des émissions). Par ailleurs, **les scénarios respectent une cible de neutralité climatique qui concerne l'ensemble des principaux gaz à effet de serre et pas uniquement le CO_2 (notamment le méthane, le protoxyde d'azote et les gaz fluorés).** La contribution au réchauffement de ces différents gaz est convertie en tonne équivalent CO_2 selon les conventions en vigueur[6]. Le bilan des émissions nettes est donc exprimé en tCO_2eq (émissions positives moins émissions négatives des puits pour tous les gaz). La mention à la « neutralité carbone » doit donc être comprise en ce sens, comme extension de langage.

2.3. Explicitation des récits et structuration des scénarios

Quatre grandes étapes de travail ont permis d'expliciter les récits et le contenu des scénarios.

1. Explicitation des récits selon des axes structurants. Comme cela a été décrit précédemment pour les scénarios du GIEC, des grands axes de description de différentes dimensions du contexte technique, économique, social et institutionnel des scénarios ont été considérés. Les éléments de récit sur chacun de ces axes sont décrits de façon à distinguer les hypothèses des scénarios entre eux et chercher à expliciter un premier niveau de cohérence interne aux récits *(Tableau 1)*.

2. Exploration des dimensions symboliques des récits. Les scénarios portent en eux des visions différentes du monde qui peuvent être nourries par différentes idéologies, au sens d'un ensemble plus ou moins cohérent d'idées, de croyances et de doctrines propre à une époque, une société, des individus et qui oriente l'action. La symbolique est toujours plus ou moins présente dans la perception des scénarios et leur comparaison. Elle peut orienter la préférence pour une stratégie, une perception du faisable et du souhaitable selon une vision sociétale de la transition écologique.

3. Explicitation et analyse tirées des diverses expertises de l'ADEME. À partir de ces descriptions générales des scénarios, l'ensemble des domaines d'expertise de l'ADEME a été mobilisé. En premier lieux les expertises d'ingénieurs ont permis d'expliciter les hypothèses qui traduisent les stratégies de transformation réalisées dans les différents secteurs impliquant des émissions de gaz à effet de serre (l'aménagement du territoire, les bâtiments, les transports, l'industrie, l'agriculture, la forêt, la production et la distribution d'énergie, les déchets). Des expertises économiques et sociales sur les filières concernées seront également publiées pour approfondir les récits, examiner les scénarios, analyser et comparer leurs implications.

4. Communication et entretiens auprès d'un groupe de citoyens français en juin 2021 *(Chapitre 2)* pour expliciter l'évolution des modes de vie. Des versions simplifiées de communication des récits ont été présentées lors de ces entretiens, pour discuter de leur perception des quatre scénarios, des changements, difficultés et avantages qu'ils imaginent en s'y projetant, de leur caractère

6 Les valeurs de pouvoir radiatif du 4e rapport du GIEC (AR4) sont utilisées. Elles permettent une comparaison avec les résultats de la SNBC et des études précédentes. Les valeurs AR5 permettront de comparer les résultats avec ceux des futurs travaux.

faisable ou souhaitable selon eux. Ces entretiens ont ainsi permis de se projeter collectivement, d'identifier les points de désaccords, les connaissances qu'il faut diffuser ou produire. Ce travail est une première pour un exercice de prospective nationale sur la transition écologique. Il est essentiel pour favoriser le débat, l'adhésion et l'appropriation la plus large possible des futures stratégies nationales de transition écologique.

EXPLICITATION DES AXES STRUCTURANTS DE RÉCIT

La structuration des grands axes de récit s'inspire d'un travail de synthèse du Groupe Transversal Prospective du Conseil de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi) [1] : un dépouillement systématique des grandes prospectives internationales aux horizons 2030, 2050 et 2100, à des échelles mondiale, européenne, continentale ou infracontinentale (Asie, Afrique et Amérique) a été réalisé en vue d'identifier les grandes familles de scénarios mobilisables pour les sciences de l'environnement. Un corpus d'études récentes (moins de 15 ans) comportant au moins un scénario sur l'environnement a ainsi été analysé.

Onze familles de scénarios décrivant trois types de récits de futurs ont été identifiées : des trajectoires de déclin (« Fragmentation », « Repli » et « Chaos »), d'action environnementale non prioritaire (« Inertie », « Croissance à tout prix », « Priorité au social ») et d'action environnementale volontaire et prioritaire (prenant diverses formes comme « Local », « Réaction », « Croissance verte », « Proaction », « Synergies positives »). Les quatre scénarios ADEME de neutralité carbone appartiennent à cette dernière catégorie de récit.

Nous nous inspirons de la grille de description DEGEST établie par AllEnvi pour comparer les différences entre les 307 scénarios étudiés[7]. Cette grille regroupe six axes structurants de description des récits : (i) Démographie, (ii) Environnement, (iii) Gouvernance, (iv) Économie, (v) Société, (vi) Technologies. Chaque scénario met l'accent sur le rôle prépondérant de facteurs moteurs d'évolution du futur qui appartiennent à ces catégories. Les récits se distinguent par la nature et les évolutions de ces variables.

En s'inspirant des grilles de description de scénarios prospectifs du GIEC et d'AllEnvi, nous avons retenu **cinq axes structurants renseignés par les équipes du projet à savoir : techniques, économie, société, gouvernance et territoires** *(Tableau 1)* (ajouté aux axes d'AllEnvi pour tenir compte de l'importance prise par les enjeux territoriaux de la transition[8]). Seule la catégorie démographie a été extraite de cette liste, car elle constitue une variable de cadrage commune, identique pour tous les scénarios ADEME *(Tableau 3)*. Des récits contrastés selon ces axes de description permettent de définir des archétypes de visions de futurs et des fils rouges auxquels se référer pour faire un choix d'hypothèses qualitatives et quantitatives et conduire les analyses plus fouillées. Ils ont permis d'orienter dans un même sens les experts de chaque domaine pour leur exploration, en apportant une première contrainte de cohérence par le récit.

7 Cette classification proposée par [18] est souvent mobilisée dans les travaux internationaux de prospective. Elle rend compte de 90 % des variables motrices prises en compte en prospective, quel que soit le champ d'étude de celle-ci.

8 De nombreux travaux mettent en exergue l'importance des territoires infranationaux comme l'illustrent les réflexions grand public développées dans le livre *Où Atterrir ?* de Bruno Latour, mais aussi dans de nombreux travaux académiques sur le rôle des villes et des territoires pour les systèmes énergétiques et métabolisme urbain (AIE, IRENA, GIEC, les travaux de Jacques Theys, Sabine Barles, Olivier Coutard, Fanny Lopez, Cyria Emelianoff, etc.). En outre, la France affiche une volonté de s'engager dans un processus de décentralisation, pour partie énergétique, dont les composantes peuvent être motrices à l'avenir pour le modèle énergétique et environnemental.

Tableau 1 *Première description des scénarios de neutralité carbone de l'ADEME selon cinq axes structurants de récits*

		TEND	Génération frugale S1	Coopérations territoriales S2	Technologies vertes S3	Pari réparateur S4
TECHNIQUES	Numérique	• Multiplication des objets connectés • Hausse de la durée de vie des équipements • « Individualisation » des services et des usages *via* des applications	• Nouveaux usages du numérique, très collaboratif et au service de la mutualisation	• Numérique au service de nouveaux modèles économiques innovants, en lien avec le territoire	• Déploiement numérique dans une logique d'optimisation	• Multiplication des objets connectés, big data, robotisation massive
	Dépenses de R&D	• Plan d'investissements d'avenir, programmes et mesures limités et ciblés (crédit d'impôt recherche, etc.)	• Faible dynamique d'innovation technique axée sur des innovations sociales	• Mécanismes de soutien innovants avec parties prenantes citoyennes, territoriales et industrielles	• Investissements nombreux en R&D, innovations généralisées et soutien à la production	• Investissements en R&D très ciblés • Recherche dans les domaines clés (énergie-biotech-stockage géologique, recyclage)
	Leviers principaux sur les émissions	• Un peu de tout, deux fois plus d'investissements fossiles que d'efficacité énergétique ou EnR	• Sobriété forte et efficacité énergétique	• Sobriété, efficacité énergétique et diversification des renouvelables selon les territoires	• Ciblage de l'offre sur les énergies décarbonées, efficacité énergétique	• Offre énergétique bas carbone et décarbonée, + captage et séquestration du carbone (CCS) + puits technologiques
ÉCONOMIE	Modèle économique	• Décélération structurelle de la croissance, poursuite de la tendance historique de ralentissement	• Moindre attention à la croissance du PIB qu'à d'autres indicateurs sur le contenu de la croissance	• Croissance plus qualitative que quantitative, « réindustrialisation » de secteurs clés, redistribution	• Verdissement de la croissance, poursuite de la tertiarisation de l'économie, métropolisation et *techno push*, politique d'offre	• Activité encore relativement carbonée, réduction de la pauvreté par une forte croissance
	Marchés et commerce international	• Stabilisation des échanges extérieurs en volume • Balance commerciale déficitaire	• Commerce international contracté • Économie plutôt protectionniste • Circuits courts de biens et services (ex. : alimentation)	• Marché dual (commerce international plus régulé + essort de marchés locaux), protectionnisme ciblé (social et environnemental) et planification multi-échelle (locale, nationale, européenne)	• Acteurs publics comme garants du cadre d'action des acteurs privés	• Forte mondialisation • Fortes spécialisations territoriales (tirant parti d'avantages comparatifs)
	Incitations et financement de la transition	• Fiscalité environnementale plafonnée (ex. : Contribution Climat Énergie) • Dette publique limitée, mais endettement croissant des ménages et des entreprises	• Mobilisation et investissement de l'épargne existante dans la transition écologique, quotas CO_2 échangeables	• Fiscalité carbone et environnementale croissante (fin des exemptions et mesures d'accompagnement des entreprises et des ménages) • Moyens additionnels dédiés pour lutter contre la précarité énergétique	• Fiscalité carbone croissante sur les secteurs non soumis à concurrence internationale, abondement du budget de l'État	• Fiscalité carbone minimaliste et ciblée • Investissements financés par la croissance et l'endettement
SOCIÉTÉ	Modes de vie	• Difficultés économiques, valorisation sociale de la consommation, conscience écologique croissante • Niveau d'éducation général en hausse	• Frugalité • Préférence pour le local • Transparence de la gouvernance, des chaînes d'approvisionnement, etc. • Recherche de sens	• Redistribution • Évolution plus soutenable des modes de vie • Recherche d'accès aux usages plutôt qu'à la propriété des objets	• Consumérisme vert • Société connectée	• Diffusion et amplification du modèle de consommation individuelle de masse
	Inégalités, revenus, emplois	• Chômage • Pauvreté stable	• *Statu quo* ou réduction des inégalités et partage du travail (ex. : réduction du temps de travail, limite des écarts de salaires, etc.)	• Réduction forte des inégalités au moyen de politiques de redistribution	• Inégalités géographiques (territoires denses *versus* peu denses) et sociales maintenues, question sociale traitée par la croissance	• Hausse en moyenne des revenus, mais maintien voire accroissement des inégalités

Suite page suivante

		TEND	Génération frugale S1	Coopérations territoriales S2	Technologies vertes S3	Pari réparateur S4
GOUVERNANCE	**Modalités de régulation économique**	• Soutien de l'offre « verte » et fiscalité incitative à l'arrêt • Régulation limitée, favorisant les instruments de marché parfois erratiques (ex. : *Emission Trading Systems*, ETS)	• Réglementation, interdiction et quotas • Incitations à l'innovation des pratiques, des usages et de la demande sur les marchés • Arrêt net du soutien aux activités néfastes pour le climat (ex. : subventions fossiles)	• Fiscalité environnementale et redistributive • Régulation par les marchés, articulation optimale entre besoins et offres • Nouveaux modèles économiques (ex. : de la « fonctionnalité ») et développement local autonome	• Outils incitatifs pour la R&D, le déploiement et l'adoption de nouvelles technologies • Régulation par l'offre sur les marchés • Politiques sectorielles et industrielles fortes, nationales et/ou européennes	• Soutien du côté de l'offre principalement, sans limiter les usages • Mondialisation avec coopération, notamment transfert de technologies
	Niveaux de décision et degré de coopération internationale	• Fragmentation du monde en grands blocs régionaux (États-Unis, Chine, Europe) et au sein de l'Europe (*Brexit*)	• Poids accru du local, faible coopération internationale • L'État donne les objectifs, le choix des moyens revient aux territoires et acteurs locaux (nouvelle phase de décentralisation)	• Décisions nationales, coopération internationale faible hors de l'UE (concurrence internationale, taxe carbone aux frontières) • Subsidiarité renforcée des États de l'UE	• Poids des décisions nationales et supranationales (UE), encadrement des acteurs privés, mais au-delà une coopération internationale faible (concurrence internationale)	• Coopération internationale forte mais limitée à quelques programmes et filières clés • Pas de réelle gouvernance mondiale sur l'environnement
	Groupes d'influence/ efficacité des institutions	• État se recentre sur ses fonctions régaliennes • Légitimité affaiblie et défiance envers les institutions	• Poids des communautés, associations et réseaux citoyens • Collectivités territoriales légitimées et dotées de nouveaux moyens • État en retrait en dehors des orientations et politiques générales	• Groupes composites : secteur public, entreprises, dont médias, citoyens • Efficacité et légitimité forte des institutions • État protecteur et stratège	• État régulateur en soutien à l'innovation et l'entrepreneuriat, plutôt qu'investisseur, hormis dans des secteurs stratégiques	• Réseaux et organisations internationales en soutien à quelques grands programmes et coopérations ciblés
	Outils de gouvernance	• Budget vert, mais pas encore de mise en cohérence des outils politiques au profit de la transition écologique	• Priorité des investissements et des choix publics à la transition écologique avec l'implication des citoyens • Réorientations des moyens sur les actions de baisse rapide des besoins énergétiques et des GES, et logiques de soutien aux territoires	• Instances de décisions multipartites (territoires, corps intermédiaires, entreprises, citoyens) • Politiques environnementales contractuelles et multi-échelles • Mesures protectionnistes • Politiques de développement humain (éducation, santé)	• Politiques de développement économique additionnelle, la question climatique est prise en charge et traitée par le milieu économique	• Politiques de développement économique sans coercition, constitution de groupements d'acteurs sur les technologies clés (ex. : de CCS) • Travail spécifique sur l'acceptabilité des technologies clés
TERRITOIRES	**Modèle de développement local**	• Nouvelle organisation économique et territoriale (ex. : tiers-lieux, télétravail) • Métropoles motrices mais poursuite étalement urbain (10 à 14 % de surfaces artificialisées en 2050 – tendance décrite dans le scénario AME de la SNBC)	• Rôle important des territoires comme catalyseurs de ressources et de leviers d'actions vers la transition écologique • Biorégionalisme • Maîtrise forte de l'étalement urbain • Repeuplement de zones délaissées : communes rurales, petites villes…	• Contractualisation entre zones urbaines et rurales, agglomérations et *hinterlands* • Planification énergétique locale et politiques foncières structurantes (construction, forêt…) • Contre-urbanisation et reconquête démographique des territoires périphériques et ruraux	• Rôle moteur des métropoles, espaces d'innovation et de déploiement des nouvelles techniques et des pratiques de partage • Mise en concurrence des territoires selon leurs potentiels et avantages comparatifs • Villes « fonctionnelles »	• Poursuite de l'étalement urbain • Pilotage centralisé de l'évolution des systèmes énergétiques • Modèle territorial standardisé • Métropolisation

L'ensemble de ce travail, nous a naturellement amené à nommer les scénarios en rapport avec l'élément structurant de leur contenu dans une forme condensée, à savoir :

S1. Génération frugale ;

S2. Coopérations territoriales ;

S3. Technologies vertes ;

S4. Pari réparateur.

EXPLORATION DES DIMENSIONS SYMBOLIQUES DES RÉCITS

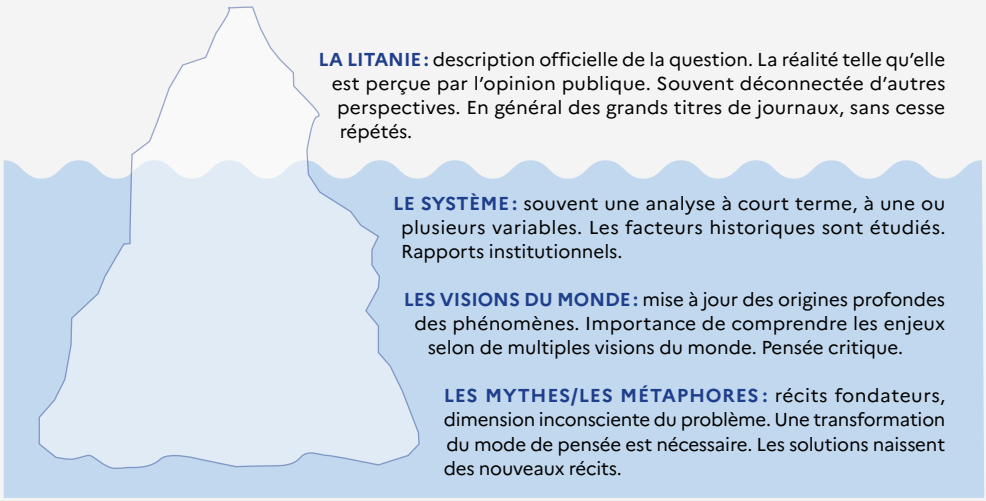
Une première exploration de la symbolique des quatre récits a également été réalisée en début de projet en suivant l'approche d'Analyse Causale Multiniveau (ACM) utilisée en prospective pour expliciter différents niveaux de discours (du superficiel au structurel et au plus implicite).

La méthode ACM identifie quatre niveaux de discours sur des futurs cohérents :

1. la litanie qui décrit des discours dominants et récurrents ;
2. le système, les discours sur les variables et leurs relations ;
3. les visions du monde, les propos qui légitiment et étayent ces futurs ;
4. les métaphores qui lient ces futurs à des symboliques et mythes profondément ancrés dans la culture et l'histoire de la population.

Au-delà des éléments rationnels, scientifiques et techniques mobilisés pour analyser et décrire les scénarios, ces discours font référence à des ordres de justification, parlent à l'intuition, aux vécus et aux valeurs des individus. On peut décrire différents niveaux, du superficiel au plus profond, avec l'image de l'iceberg.

Figure 1 Exploration de la dimension symbolique des récits : l'Analyse causale multiniveau (ACM)



Source : [19].

Le *Tableau 2* ci-dessous présente quelques illustrations des types de discours qui peuvent être associés à chaque scénario et qui symbolisent des visions alternatives du chemin vers la neutralité climatique. Cette exploration fait appel aux perceptions, à l'idée que l'on peut se faire de ces futurs. L'exercice permet de prendre du recul, d'expliciter la façon dont ces scénarios peuvent être perçus, ce qui détermine tout autant les raisonnements techniques et rationnels que les préférences pour un chemin. **Expliciter la symbolique permet de questionner les *a priori*, les à-côtés qui déterminent les opinions. Puis de confronter ces *a priori* ou ces perceptions avec l'état des connaissances apportées par les expertises.**

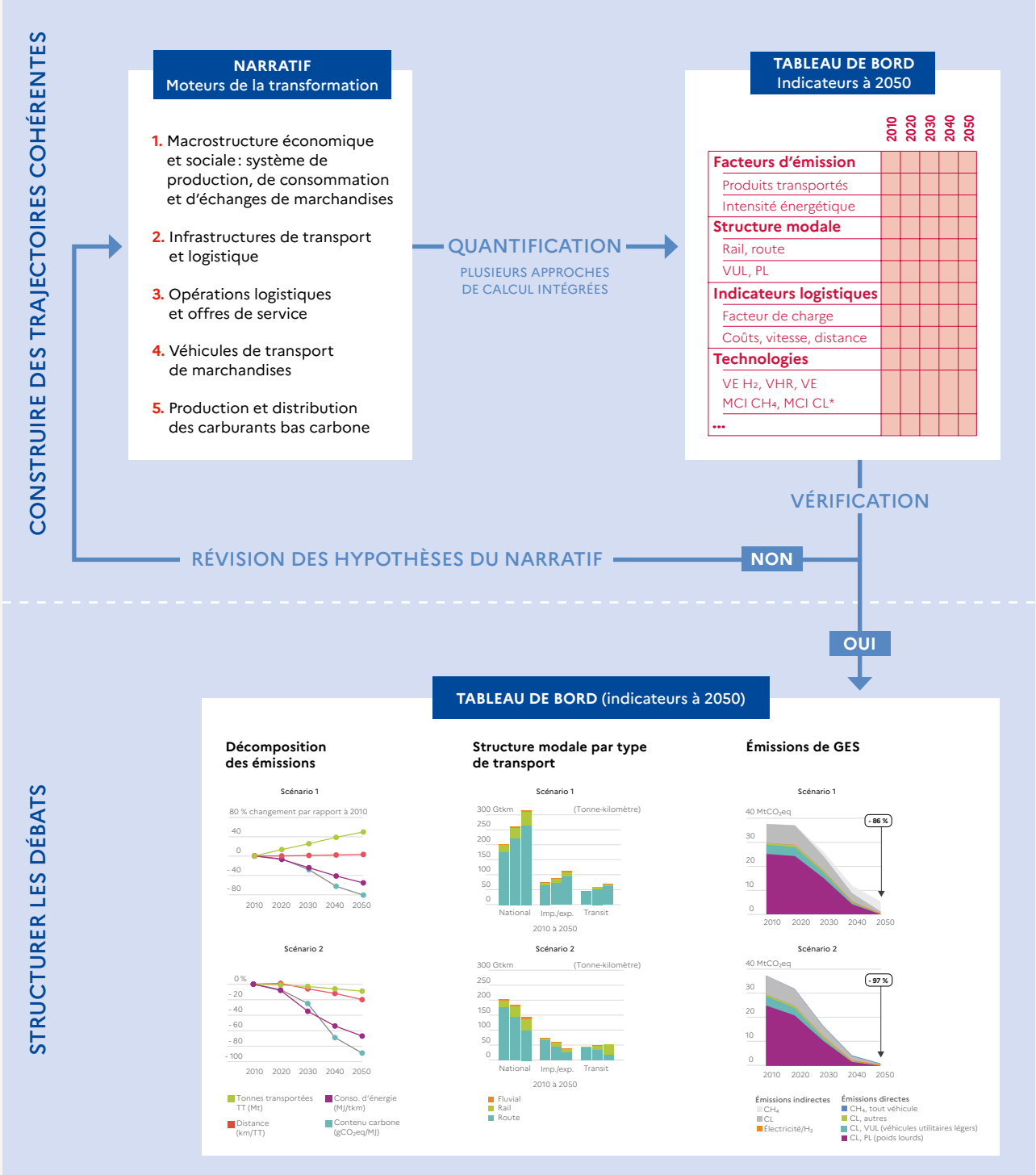
Tableau 2 Exploration de la symbolique pour les quatre scénarios de la prospective ADEME

	Génération frugale S1	Coopérations territoriales S2	Technologies vertes S3	Pari réparateur S4
Exemples de litanie	• Accord Mondial Climat • Quotas et réglementations	• Nouveaux indicateurs de bien-être • Partenariats	• Croissance verte • *Greentechs*	• Exploitation minière spatiale de métaux • Ingénierie
Éléments de système	• Découplage impossible ; une réduction des volumes est requise • Vision holistique	• Transition juste • Contractualisations et partenariats • Marges de manœuvre par régulation et institutions • Vision systémique	• Solution par amélioration technique • Économie de l'innovation • Découplage entre création de richesses et impacts environnementaux	• Il est plus simple de réparer plutôt que transformer les systèmes productifs et nos modes de vie • Compensation, réparation des dégâts
Vision du monde	• Prise en compte des limites • Monde fini • Moins ça suffit, moins c'est bien • Retour à la terre • Décroissance • Vision malthusienne • Nature sacralisée	• *Green New Deal* • Planification orchestrée • Nouveau contrat social • Éthique de délibération • Consommer moins, consommer mieux • Nature institutionnalisée	• 3e révolution industrielle • Progrès et gain d'efficacité • Liberté d'entreprendre • Imaginaire urbain • Vision cornucopienne • Nature comme capital productif	• Les limites sont un horizon à dépasser • Les enjeux justifient les moyens • Programme industriel ciblé • Solutions techniques • Nature maîtrisée
Mythe Métaphore	• Gaïa • Âge d'or	• Déméter • Orphée • Arbre à palabres • Captain America	• Pasteur • Ironman	• Prométhée • Eldorado • Projet Manhattan • Mission Apollo • Thor

2.4. Mobilisation des expertises et analyses quantifiées

Les experts de l'ADEME ont ensuite traduit dans leurs domaines d'expertise ces premiers récits, de façon à expliciter les transformations qui se réalisent dans chacun des scénarios, en analyser la cohérence, les ordres de grandeur et les implications. **Nous avons suivi ici une procédure itérative d'ajustement des hypothèses et des résultats** *(Figure 2)* : des hypothèses sont posées, les quantifications réalisées et les résultats sont étudiés, puis les hypothèses et les résultats sont modifiés plusieurs fois, jusqu'à obtenir une cohérence satisfaisante entre expertises et avec la cible de neutralité carbone visée.

Figure 2 Procédure d'élaboration des analyses quantifiées (exemple du secteur des transports)

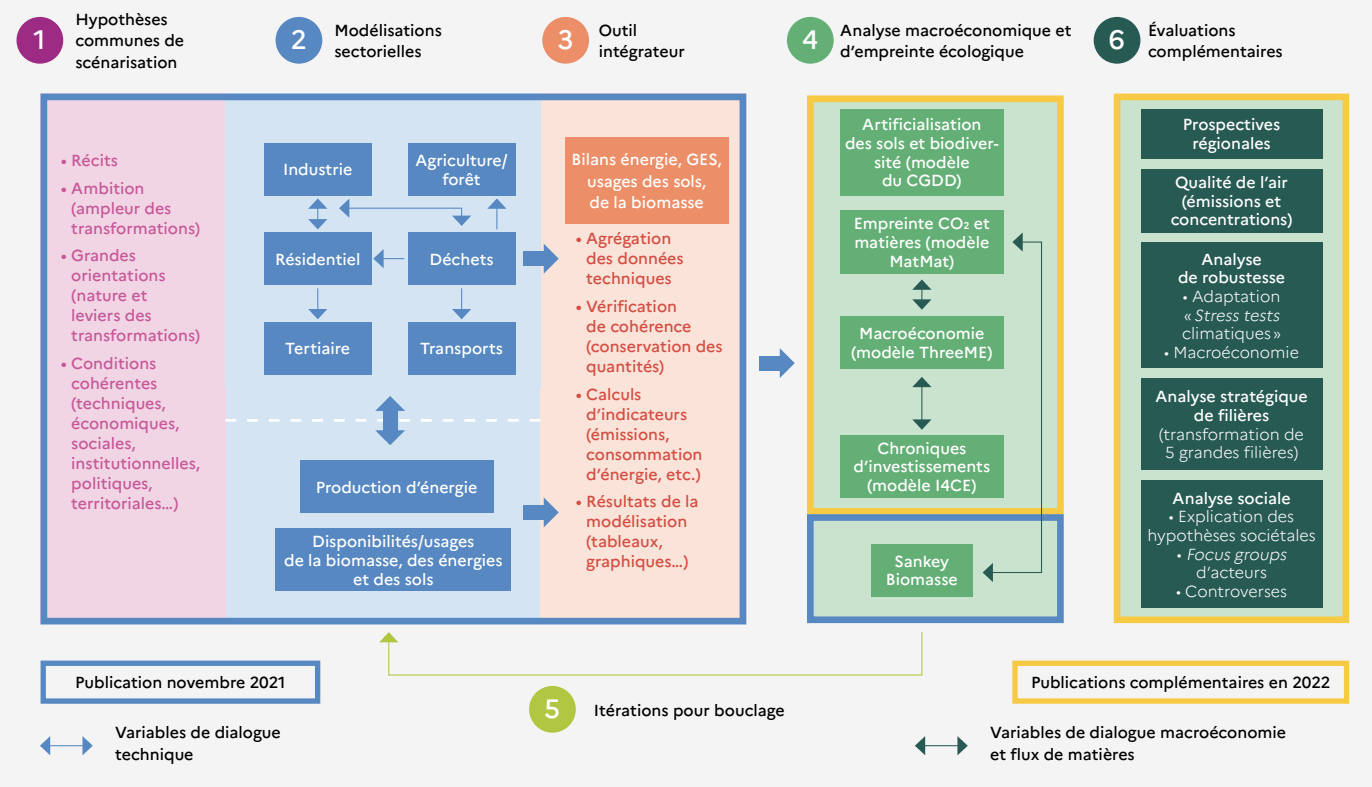


* VE H_2 : véhicules électriques hydrogène à pile à combustible, VHR : véhicules hybrides rechargeables, VE : véhicules électriques, MCI CH_4 : moteur à combustion interne – CH_4, MCI CL : moteur à combustion interne – carburant liquide.

Source : [20].

La *Figure 3* résume les étapes de travail et donne une vision d'ensemble des expertises mobilisées.

Figure 3 Démarche générale de l'analyse quantifiée et chaîne de modélisation de l'ADEME



De manière schématique *(Figure 3)*, la démarche suivie se résume ainsi :

1. **définition initiale des scénarios et des récits :** des premières hypothèses communes de scénarisation ont été posées au départ pour cadrer l'exploration. Quelques hypothèses quantifiées communes à tous les scénarios ont également été posées *(Tableau 3)* ;

2. **réalisation des modélisations sectorielles et simulations des scénarios :** les hypothèses ont été précisées dans chacun des domaines d'analyse, leurs valeurs ont été quantifiées et des modèles ont été utilisés pour déduire les conséquences des transformations envisagées (sur les besoins énergétiques, les émissions, les puits de carbone, les besoins en sols, en biomasse, en matériaux, etc.) ;

3. **agrégation des données qui sont rassemblées et mises en cohérence.** Les contraintes de cohérences sont comptables : les usages des sols doivent correspondre aux surfaces disponibles, la biomasse utilisée à la biomasse produite, les consommations d'énergie à l'approvisionnement et à la production, etc. Le calcul et l'agrégation des émissions de chaque secteur et des puits permettent de mesurer la distance restante à la cible de neutralité carbone ;

4. **réalisation d'itérations pour établir la cohérence et respecter la cible de neutralité carbone.** Les cinq itérations ont été réalisées entre décembre 2020 et juillet 2021 *(Figure 4)*, avec au sein de chaque itération l'alternance de temps de travail en chambre, par expertise sectorielle, avec des temps de mise en commun, de dialogue entre expertises et de mise en cohérence de l'ensemble ;

5. **utilisation des données sectorielles cohérentes pour conduire les analyses macroéconomiques et d'empreinte de la consommation des Français :** le résultat de ces analyses sera ainsi cohérent au terme du processus avec les quantifications des analyses techniques sectorielles. Mais ces analyses demandent plus de temps et arrivent nécessairement en fin de processus. Les résultats finaux seront publiés dans deux publications spécifiques début 2022 ;

6. **réalisation d'études et évaluations complémentaires.** Certains travaux ont été engagés en parallèle. Ils seront finalisés en 2022 à partir des scénarios stabilisés (qualité de l'air, mise en discussion avec des citoyens, analyses stratégiques de filières, analyses de robustesse et de sensibilité à des chocs, zooms territoriaux, etc.). Ils donneront lieu également à des publications spécifiques.

APERÇU DES MODÈLES UTILISÉS (*cf.* chapitres sectoriels *[Partie 2]* pour plus de précisions)

MoSUT, modèle du secteur agricole, développé par Solagro, il permet de représenter les productions agricoles associées à l'ensemble des demandes de biomasse (alimentation, matériaux, énergie, puits de carbone…).

ANTONIO, modèle du secteur résidentiel, développé par Énergies demain, Enerdata et I Care, il donne une représentation fine du parc de logements et de ses caractéristiques techniques et thermiques.

VIVALDI, modèle du secteur tertiaire, développé par l'ADEME, il donne une représentation technique du parc de bâtiments selon des grandes catégories d'usages (santé, vieillesse, enseignements, commerces, bureaux…).

GESTIME, calculateur statique climat-énergie initialement développé par la DGEC pour la SNBC, doté d'un modèle du secteur des transports (approfondi par l'ADEME et Enerdata pour le présent exercice).

SANKEY BIOMASSE, développé par l'INRIA, la FCBA et Arvalis, il permet de représenter les différents usages et flux de biomasse, particulièrement importants dans un contexte où la biomasse est de plus en plus sollicitée.

PEPITO, développé par l'ADEME et négaWatt, il représente les productions physiques des 9 branches industrielles les plus énergo-intensives, en lien notamment avec les secteurs grands consommateurs de matériaux (bâtiments, mobilité…).

Tableur Déchets, développé l'ADEME, il permet de simuler la production et la gestion des déchets en cohérence avec les politiques déchets mais également avec les demandes sectorielles de matières premières de récupération ou d'énergie par l'industrie ou les réseaux de chaleur.

Trois modélisations ont servi à évaluer les puits de carbone naturels dans les scénarios : le modèle **ClimAGri®** (effets des changements d'occupation des sols et des évolutions des pratiques agricoles), les quantifications des **scénarios forestiers de l'INRAE** (effets de la gestion forestière), un **modèle d'accumulation-dégradation des produits biosourcés** (stockage dans les matériaux en bois).

L'outil intégrateur. Développé par Lo10, l'ADEME et Enerdata, il s'agit d'une interface d'agrégation des données issues des différentes modélisations sectorielles et utilisé pour mettre en cohérence ces données et en déduire un bilan de consommation et de production des différentes sources d'énergie, des émissions de GES et des puits. Il permet de construire une image quantifiée d'ensemble et une base de données des scénarios. Il est utilisé pour observer les résultats obtenus lors des différentes itérations de simulation et déterminer les hypothèses à ajuster. La base de données a vocation à intégrer des données nouvelles produites par les évaluations complémentaires. Il permet une transparence ainsi qu'une mise à disposition des données, hypothèses, métadonnées et résultats des scénarios téléchargeables en *open source*. La base de données des scénarios sera finalisée et mise en ligne en 2022.

LES MODÈLES ÉCONOMIQUES ET D'EMPREINTE ÉCOLOGIQUE

Chroniques d'investissements, tableur développé par I4CE qui permet la modélisation des financements nécessaires pour déployer les évolutions techniques. L'analyse reprend les évolutions techniques des analyses sectorielles et leur attribue des coûts d'investissement. Elle offre un panorama des financements climat en projetant des chroniques de besoins d'investissement cohérents avec les hypothèses de chaque scénario.

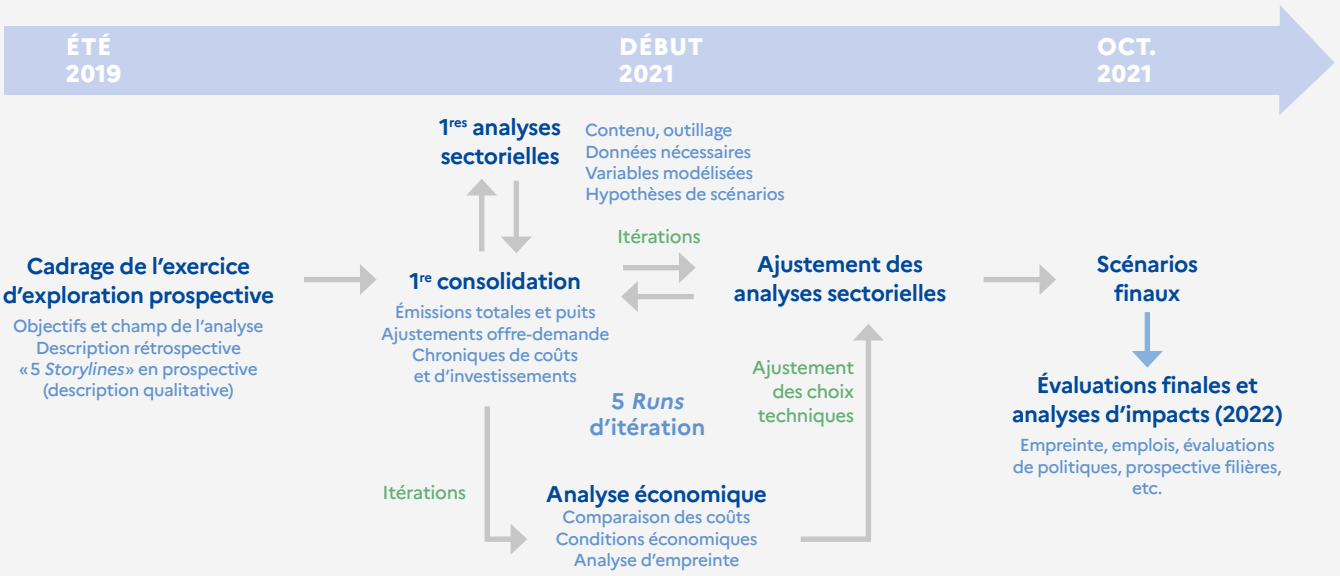
ThreeME, modèle de simulation macroéconomique, développé par l'OFCE et l'ADEME, il permet l'analyse de conditions économiques compatibles avec les évolutions énergétiques, écologiques et techniques, ainsi que l'évaluation d'indicateurs sur les conséquences économiques des scénarios et les politiques publiques de transition écologique.

MatMat, outil de modélisation développé par le CIRED, il permet d'évaluer l'empreinte de la consommation française pour un ensemble de matériaux, ressources naturelles et gaz à effet de serre. Il complète l'évaluation en prenant en compte le contenu en ressources et GES des produits importés et consommés en France ainsi que celui des biens et services exportés.

IMACLIM, modèle macroéconomique développé par le CIRED, il est utilisé pour conduire une analyse de robustesse des stratégies à de nombreuses combinaisons d'hypothèses macroéconomiques (incertaines).

Artelys Crystal Super Grid, modèle de simulation et d'équilibrage du système électrique au pas de temps horaire développé par Artelys. Il permet de vérifier les conditions de stabilité des réseaux électriques (stockage, gestion de la pointe, etc.).

Figure 4 Calendrier de réalisation et déroulement des analyses quantifiées



Des hypothèses communes de cadrage ont été prises par l'ensemble des modélisateurs pour assurer un premier niveau de cohérence du contexte démographique, climatique et économique. Le *Tableau 3* résume les principales hypothèses retenues. Le détail des évolutions observées entre 1990 et 2020 et des évolutions supposées entre 2020 et 2050 pour ces variables sont disponibles en *annexe* de ce chapitre.

Ces hypothèses de cadrage concernent :

- la démographie, qui suit le « scénario bas » des projections de l'INSEE [21] correspondant le mieux à la trajectoire actuelle et au ralentissement constaté de la fécondité. L'évolution de la démographie tient compte également de l'évolution de la pyramide des âges avec la poursuite du vieillissement de la population française. Elle inclut également une hypothèse de solde migratoire tenant compte des évolutions observées sur le long terme et qui est stable au niveau observé sur la période 2000-2010. La projection ne suppose pas de ruptures de tendance plus incertaines qui pourraient advenir sous des hypothèses particulières géopolitiques et climatiques ;

- l'évolution du climat en France provient des dernières projections des modèles climatiques de Météo-France [22] et correspond au scénario intermédiaire de trajectoire d'émissions mondiales et d'évolution du climat du GIEC (RCP 4.5). Ce scénario suppose une action mondiale insuffisante pour contenir le réchauffement à 1,5 ou 2 °C au-dessus de l'ère préindustrielle (1900-2050). Cette hypothèse se fonde sur l'état actuel des NDC et correspond à l'hypothèse d'une action volontariste et exemplaire de la France qui ne présuppose pas que le reste du monde y parvienne ;

- l'évolution du contexte économique est décrit plus précisément dans les analyses sectorielles et macroéconomiques. Ces analyses identifient des conditions économiques compatibles avec les transformations décrites dans chacun des scénarios. Elles examinent également des conséquences économiques de ces changements (besoins d'investissements, effets sur l'activité économique et l'emploi, les coûts de production et les revenus, les politiques économiques, etc.). Des hypothèses communes sont retenues pour la croissance potentielle de la productivité et de l'activité économique[9] (activités matérielles et immatérielles), ainsi que des hypothèses sur la tendance d'évolution des prix des énergies fossiles importées, déterminante pour l'incitation à réduire l'usage de ces énergies. Ces évolutions sont très incertaines et débattues. Pour faciliter les comparaisons avec les scénarios officiels, nous avons retenu les recommandations aux États de la Commission européenne pour les prix des énergies fossiles [23] et les hypothèses de croissance potentielle de long terme du scénario AMS de la SNBC [4]. Cette hy-

9 La croissance potentielle se distingue de la croissance réalisée. Le potentiel de croissance à long terme s'estime à partir d'une hypothèse d'évolution de la population active et d'une hypothèse d'évolution de la productivité moyenne d'un travailleur. La croissance réalisée se distingue de ce potentiel en raison de nombreuses sources d'inefficacité : chômage, déficit de capital productif, d'infrastructures, inefficacités dans l'organisation collective, répartition des richesses, disponibilité de matières premières, etc. L'hypothèse de croissance potentielle n'est donc pas distinguée entre les scénarios, puisque aujourd'hui il n'existe pas d'étude robuste des effets comparés de stratégies bas carbone sur la croissance potentielle. Toutefois, les analyses macroéconomiques menées par l'ADEME permettent d'estimer l'effet des scénarios de transition écologique sur la croissance réalisée et l'emploi (*cf.* analyse macroéconomique qui sera publiée en 2022).

pothèse de croissance de la productivité est une hypothèse haute étant donné la tendance de ralentissement constatée depuis les années 1980 et les travaux macroéconomiques qui ont souligné la possibilité d'une « stagnation séculaire » dès la fin des années 1990. Mais elle a le mérite de nous faire considérer des situations où le niveau des émissions peut être majoré par la croissance de l'activité économique. **L'analyse technique et macroéconomique permettra ainsi de révéler l'évolution du contenu matériel des activités économiques futures qui est nécessaire pour atteindre les objectifs tout en envisageant un développement économique.** Ces analyses nourriront la discussion sur la possibilité de découpler l'activité économique future de la pression sur les ressources, le climat et les écosystèmes et favoriseront une réflexion sur la nature précise de la réorientation des activités économiques.

Ces hypothèses de cadrage ont été retenues pour l'ensemble des quatre scénarios de transition écologique. Des hypothèses spécifiques au scénario tendanciel ont été retenues pour l'évolution du climat et les prix des énergies importées. Pour le climat, elles reprennent la trajectoire tendancielle de réchauffement décrite par le GIEC dans le cas où le monde continuerait à émettre beaucoup de GES (scénario RCP 8.5). Nous considérons les projections du climat national correspondantes [22]. Nous utilisons les projections de prix du pétrole de l'Agence Internationale de l'Énergie [24] dans le cas d'un scénario de reprise lente de l'activité économique et de faible action climatique (*Delayed recovery*). Cette hypothèse se traduit par un renchérissement modéré du baril de pétrole, ce qui est cohérent avec un usage important des énergies fossiles mais qui n'est pas favorable à la transition énergétique.

Après un travail préparatoire engagé en 2018, le travail de construction des scénarios présentés dans cette publication a été réalisé de l'été 2019 à l'été 2021, par les équipes du projet et les partenaires de l'ADEME qui ont contribués à l'analyse (*cf. Remerciements*). **Les scénarios présentés ici n'engagent que l'ADEME, mais le travail a donné lieu à de nombreux échanges, consultations et discussions avec de nombreux spécialistes de chaque domaine technique et de nombreux acteurs français sur la transition écologique *(Figure 5)*.** Le Conseil scientifique de l'ADEME étendu à quelques personnes qualifiées (appartenant au Haut Conseil pour le Climat, au Commissariat général au développement durable et à la Direction générale de l'énergie et du climat du ministère de la Transition écologique, à la Direction générale de la recherche et de l'innovation du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et à l'Agence française de développement) a contribué à l'amélioration de la démarche et de la gouvernance du projet, en éprouvant sa qualité scientifique et méthodologique et la pertinence des objectifs visés et des débouchés attendus, sans pour autant influer sur les choix et les hypothèses chiffrées des scénarios présentés qui relèvent de la seule responsabilité de l'ADEME. Ce Comité scientifique du projet s'est réuni neuf fois depuis début 2019 pour discuter des avancées du projet. En parallèle, le cadrage des scénarios et les grandes hypothèses sectorielles ont été présentés et discutés avec de nombreux acteurs institutionnels, chercheurs, prospectivistes et experts de filières concernées (par exemple, le CSTB, négaWatt, AllEnvi, OFB, IDDRI, I4CE, Solagro, AIE, EPE, EDF, ENGIE, RTE, GRTGaz, GRDF, etc.). Deux webinaires ont été organisés pour présenter et recueillir les remarques et les suggestions de plus de 500 participants le 19 mai 2020 et le 15 janvier 2021. Une liste de questions et réponses rédigées suite à

Tableau 3 Hypothèses de cadrage sur la démographie, le climat et l'économie sur la prospective ADEME

	TEND	Génération frugale S1	Coopérations territoriales S2	Technologies vertes S3	Pari réparateur S4
Démographie	**65,6 M d'habitants en 2020 ; 67,4 en 2030 ; 69,7 en 2050 en Métropole** Natalité : 1,8 enfant/femme, vieillissement (un quart de la population a + de 65 ans en 2050), solde migratoire + 70 000/an (source : INSEE, 2017, scénario fécondité basse, espérance de vie centrale et migration centrale)				
Évolution climat	Monde : + 5,4 °C en 2100 France : **+ 3,9 °C en France en 2100 (RCP 8.5 du GIEC)**	Monde : + 3,2 °C en 2100 France : **+ 2,1 °C en 2100** (2070-2100) par rapport à la référence 1976-2005 (source : Météo-France DRIAS 2021 [22] – RCP 4.5 – Logique NDC)			
Prix énergie importée	**59 et 72 USD/baril en 2030 et 2040** (source : AIE WEO 2020 [24] – scénario *Delayed recovery*)	**82 EUR/baril, 95 et 108 en 2030, 2040 et 2050** (source : Cadrage Commission européenne, 2020 [23])			
Potentiel de croissance économique	**Croissance potentielle** de long terme (population active + productivité) : **1,3 %/an en moyenne** sur la période (dont 1,1 % de productivité) (source : SNBC, 2020 [4]) L'activité économique réelle et l'emploi varient selon les scénarios (*cf.* analyse macroéconomique)				

ces échanges sera complétée après la publication des travaux. Elle sera disponible en ligne.

Cette démarche de consultation, de délibération et d'approfondissement sera poursuivie au-delà, suite à cette publication des scénarios, puis jusqu'à la fin 2022 avec les évaluations complémentaires. La discussion sera également engagée avec les corps constitués, des citoyens, les institutions territoriales et centrales et divers acteurs français et internationaux pour recueillir leurs réactions et leur permettre de s'exprimer sur la stratégie française et d'apporter leurs contributions. Elle sera menée en lien avec le processus de consultation sur la SNBC 3 qui débute.

Les récits, hypothèses et résultats présentés et commentés dans la suite de cette publication correspondent aux résultats obtenus au terme de la cinquième itération de juillet 2021.

Les chapitres qui suivent décrivent chacune de ces composantes d'expertise et les transformations qui distinguent les quatre scénarios (aménagement du territoire, bâtiment, agriculture, forêt, industrie, déchets, production d'énergie, usage des ressources en biomasse, puits de carbone, etc.). Chacun des chapitres présente succinctement les périmètres d'étude, les méthodes, les données et les modèles employés, ainsi que les hypothèses et les résultats plus détaillés. Des documents annexes plus complets fourniront des précisions techniques et une base de données contenant les résultats quantifiés sera accessible en ligne en 2022.

Enfin, **un certain nombre de publications s'étageront en « feuilletons » au premier trimestre 2022 et fourniront des analyses complémentaires** à savoir :

- mix électrique ;
- métaux de la transition écologique ;
- évaluations macroéconomiques et investissements ;
- évolution des modes de vie ;
- empreinte matière, ressources et biens de consommation ;
- usage des terres et qualité des sols ;
- adaptation au changement climatique ;
- analyse de transformations de filières : « Construction neuve », « Systèmes énergétiques », « Protéines » et « Logistique du dernier kilomètre » ;
- robustesse et vulnérabilité à des chocs ;
- qualité de l'air ;
- territoires (sous format d'un guide d'aide à la prospective pour les territoires) ;
- numérique et transition écologique.

Figure 5 Consultation et dialogue entre experts et parties prenantes sur la prospective ADEME

ADEME

- Équipe projet rassemblant différents coodinateurs des contributions d'experts de l'ADEME
- Modélisateurs
- Mise en débat interne et contribution de l'ensemble de l'ADEME

CONTRIBUTEURS EXTERNES

- Comité scientifique du projet
- Partenaires modélisateurs et analystes
- Filières industrielles (monde économique)
- Laboratoires (monde académique)
- Think tanks et groupes de réflexion
- Partenaires institutionnels

PARTIES PRENANTES CONSULTÉES

- Citoyens
- ONG
- Syndicats
- Politiques hors spécialistes
- Entreprises hors filières concernées directement

3. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **AllEnvi**, *Visions du futur et environnement. Les grandes familles de scénarios issues d'une analyse de prospectives internationales relatives à l'environnement*, Volume 1, 2016 (https://www.allenvi.fr/content/download/4797/36295/version/1/file/Sc%c3%a9nEnvi-Visions+du+futur+et+environnement_Tome1.pdf).

[2] **Loi Énergie-Climat**, Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, Légifrance, 2019 (https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000039355955/).

[3] **SNBC**, *Décret n° 2015-1491 du 18 novembre 2015 relatif aux budgets carbone nationaux et à la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC 1)*, Légifrance, 2015 (https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031493783).

[4] **SNBC**, *Décret n° 2020-457 du 21 avril 2020 relatif aux budgets carbone nationaux et à la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC 2)*, Légifrance, 2020 (https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041814459/).

[5] **HCC**, *Rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat, « Agir en cohérence avec les ambitions »*, 2019 (https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-2019/).

[6] **HCC**, *Rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat, « Redresser le cap, relancer la transition »*, 2020 (https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-annuel-2020/).

[7] **GIEC**, *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)], Cambridge University Press, In Press, 2021 (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf).

[8] **MIW**, *Uitvoerings programma Circulaire Economie 2019-2023 [Programme néerlandais de mise en œuvre d'une Économie circulaire 2019-2023*, ministerie van Infrastructuur en Waterstaat [ministère des Infrastructures et de la Gestion de l'eau], 2019 (https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/circulaire-economie/documenten/rapporten/2019/02/08/uitvoeringsprogramma-2019-2023).

[9] **Pascal Chabot**, *L'Âge des transitions*, Paris, PUF, 2015, 192 pages.

[10] **ADEME**, *Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050*, 2013 (https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/85536_scenarios_2030_2050_synthese_0613.pdf).

[11] **ADEME**, *Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050*, 2017 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/1740-actualisation-du-scenario-energie-climat-ademe-2035-2050-9791029709869.html).

[12] **Vigie 2020**, *Rapport Vigie 2020. Scénarios de rupture à l'horizon 2040-2050*, Futuribles International, 2021, 274 pages (https://www.futuribles.com/fr/document/rapport-vigie-2020-scenarios-de-rupture-a-lhorizon/).

[13] **NIC**, *Global Trend 2040*, National Intelligence Council, Report, 2021 (https://www.dni.gov/index.php/gt2040-home).

[14] **Emmanuel Combet**, « Planification et développement durable au XXIe siècle », *Oeconomia*, 10-3, 2020, 473-506. (https://journals.openedition.org/oeconomia/9558#tocto2n1)

[15] **GIEC**, *Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté* [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield, Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 2018, 32 pages (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf).

[16] **PPE**, Décret n° 2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie, Légifrance, 2020 (https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000041814432/).

[17] **Conseil d'État**, Contentieux de la Commune de Grande-Synthe et plusieurs associations environnementales, Décision du Conseil d'État du 19 novembre 2019, 2021 (https://www.conseil-État.fr/actualites/actualites/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-le-conseil-d-État-enjoint-au-gouvernement-de-prendre-des-mesures-supplementaires-avant-le-31-mars-2022).

[18] **Edward Cornish**, *Futuring: The Exploration of the Future*, Bethesda, Md: World Future Society, 2004.

[19] **Sohail Inayatullah**, *L'Analyse causale multiniveau*, Futurible, Prospective and Strategic Foresight Toolbox, 2017 (https://www.futuribles.com/fr/groupes/prospective-and-strategic-foresight-toolbox/document/lanalyse-causale-multiniveau/).

[20] **Yann Briand *et al.***, *Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France*, Rapport, IDDRI, 2019 (https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Rapport/202003-rapport%20fret%20FR.pdf).

[21] **INSEE**, *Projections de population 2013-2070*, 2017 (https://www.insee.fr/fr/information/2546485).

[22] **DRIAS**, *Nouvelles projections climatiques DRIAS 2020 pour la métropole, DRIAS les futurs du climat, Météo-France*, 2020 (http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf).

[23] **Commission européenne**, *Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2021*, Draft for consultation in CCC WG2, 25 juin 2020.

[24] **AIE**, *World Energy Outlook (WEO)*, Paris, Agence Internationale de l'Énergie, 2019 (https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019).

4. Annexes

4.1. Variables exogènes de cadrage

Les hypothèses communes de cadrage à tous les scénarios ont été généralement reprises du scénario « avec mesures existantes » (AME) mis à jour en 2021 par la Direction générale énergie-climat (DGEC) du ministère de la Transition écologique. Ce choix s'explique par le fait de :

- pouvoir facilement mettre en perspective et comparer nos scénarios avec les trajectoires officielles (AME, AMS de la SNBC);
- s'appuyer sur des sources disposant de plus d'expertises qu'en propre à l'ADEME (par exemple INSEE pour la démographie, etc.).

DÉMOGRAPHIE

1990 – 2020

La population de la France s'établit en 2019 à 67 millions d'habitants, dont 65 millions en Métropole. Le solde naturel diminue depuis les années 2010, il est divisé par deux (+ 144 000 en 2018). Le solde migratoire est assez stable autour de +60 000/an[10]. En 2018, les immigrés représentent 9,7 % de la population résidant en France métropolitaine. Entre 1990 et 2015, le solde migratoire de la France oscille entre + 77 000 et + 39 000 personnes par an selon les années.

Au-delà de 2020

Les projections de l'INSEE (scénario central 2016), reprises dans les travaux de 2019 du Conseil d'Orientation des retraites[11] ou dans la SNBC 2, traduisent une dynamique démographique globale dont les principales caractéristiques sont :

- le maintien de la fécondité, mais en deçà du seuil de renouvellement naturel ;
- l'augmentation de l'espérance de vie ;
- le maintien d'un solde migratoire positif (supérieur aux dernières années observées).

Pour 2050, dans ce scénario central de l'INSEE, c'est donc 74 millions de personnes qui sont attendues.

Concernant la pyramide des âges, c'est un vieillissement global de la population qui est prévu avec une augmentation forte des plus de 65 et 75 ans, qui représenteront à l'horizon 2050 plus de 27 % de la population.

Le solde naturel continue à décroître et le solde migratoire se stabilise à des niveaux inférieurs aux années 1990 et proche des années 2010-2020. Seules quatre régions auraient un solde naturel positif (Île-de-France, Hauts-de-France, Pays de la Loire et Auvergne-Rhône-Alpes). À noter le fait que la notion de réfugiés climatiques n'apparaît pas aujourd'hui de façon distincte du flux migratoire global.

Cependant, dans le cadre de sa modélisation AME 2021, la DGEC a été conduite à actualiser des hypothèses démographiques, ce sont celles-ci qui ont été retenues pour le présent exercice. Elle tiennent compte du ralentissement observé de la fécondité depuis les précédentes projections de l'INSEE.

PRIX DES ÉNERGIES FOSSILES IMPORTÉES

1990 – 2020

Le pétrole constitue l'énergie sur laquelle le prix des autres énergies (gaz notamment) est largement indexé ou corrélé. Aussi, pour un pays importateur comme la France (plus de 99 % du pétrole consommé est importé), les prix d'importation de cette ressource sont à regarder avec attention.

Oscillant entre 22 et 63 USD le baril (prix annuel moyen) entre 1990 et 2019, avec des passages à près de 110 USD et l'année très erratique de 2020, la volatilité des prix du pétrole est un marqueur fort de cette ressource qui permet de relativiser toutes les tentatives de projections de long terme.

10 Source : INSEE Bilan démographique 2018, https://www.insee.fr/fr/statistiques/3692693?sommaire=1912926.
Entre 2011 et 2016, les grandes aires urbaines portent la croissance démographique française, 2018, https://www.insee.fr/fr/statistiques/3682672.
Trente ans de démographie des territoires, 2014, https://www.insee.fr/fr/statistiques/1280958.

11 Perspectives des retraites à l'horizon 2030 : https://www.cor-retraites.fr/node/519.

Néanmoins, parmi les nouveautés de ces dernières années, les pétroles non conventionnels (plus coûteux à produire) jouent un rôle déterminant sur le prix du pétrole. Les nouvelles découvertes se réduisent et représentent aujourd'hui seulement 20 % de la consommation. Les pétroles ultralourds (Venezuela, Canada…) et les gisements compacts, « de schistes » (États-Unis, Canada…), ont bouleversé la production mondiale des dix dernières années.

En 2005, les découvertes en mer représentaient 10 % des découvertes mondiales. En 2010, elles deviennent plus importantes que les découvertes à terre. Elles représentent désormais 75 % des volumes découverts et sont faites principalement en mer profonde (entre 400 et 1 500 m de profondeur) ou très profonde (au-delà de 1 500 m)[12]. Or, ces ressources exigent des techniques d'extraction significativement plus coûteuses.

Outre la question du prix, la dépendance de l'Europe (premier importateur mondial avec la Chine) et plus encore de la France fait de l'approvisionnement de cette ressource un enjeu stratégique. Toutefois, avec des objectifs climatiques très ambitieux à court terme (entre - 40 % et - 55 % en 2030), on ne peut pas considérer que le pic pétrolier soit l'enjeu majeur à court terme.

2020 – 2050

Le scénario *Stated policies* du World Energy Outlook 2019[13] de l'Agence Internationale de l'Énergie projetait le prix du pétrole à 88 et 103 USD/baril en 2030 et 2040, en cohérence avec un « reste du monde » mettant en œuvre des politiques et mesures encore très insuffisantes.

Il convient de garder en tête que ces hypothèses sont entachées de grandes incertitudes, comme les progrès techniques des années 1980 ont pu l'illustrer pour limiter la hausse des coûts, ou bien comme le montrent les stratégies de pays producteurs qui souhaiteraient valoriser leurs réserves en maintenant des prix artificiellement bas, avant un « pic de demande ».

Dans son WEO de 2020, l'AIE projette des niveaux de prix plus faibles en considérant le choc économique que fut la pandémie de la Covid-19. En outre, un scénario *Delayed recovery* est venu remplacer le traditionnel *Current policies* ou *Business as usual* (BAU).

Dans sa recommandation aux États membres, le cadrage issu de la Commission européenne de 2020[14] considère des hypothèses plus proches des dernières tendances observées.

Ce sont ces données qui ont finalement été retenues, en cohérence avec le scénario AME2021.

CROISSANCE ÉCONOMIQUE

1990 – 2020

En France, comme dans de nombreux pays industrialisés, la productivité du travail a connu un tassement régulier lors des trois dernières décennies : dans le secteur marchand, la productivité du travail – mesurée comme le rapport entre la valeur ajoutée produite et le nombre de personnes en emploi – a augmenté de 1,9 % de 1990 à 1999 et de 1 % par an de 2000 à 2008 (source : INSEE, comptes nationaux, base 2014).

Pour la décennie 2010-2020, les données ne sont pas consolidées, mais le ralentissement structurel observé se poursuit évoluant entre 2014 et 2017 entre 0 et 1,2 % selon les années.

Pour rappel, ce taux de productivité était encore plus élevé sur la décennie précédente : 2,6 % en moyenne par an de 1979 à 1989[15]. Ce ralentissement de la productivité et de la croissance est un élément partagé par l'ensemble des pays industrialisés comme la perspective de travaux récents l'illustre.

Le ralentissement de la productivité et la moindre hausse de la population active aboutissent au final à une croissance potentielle de long terme qui tend à ralentir d'année en année (la croissance potentielle de long terme étant le résultat de la population active et de sa productivité).

2020 – 2050

Dans un contexte de grande incertitude, autour de la reprise suite à la crise de la Covid-19, mais aussi de l'évolution structurelle de la productivité et de la croissance à long terme, il a été retenu le taux de croissance du scénario « avec mesures supplémentaires » (AMS) de la SBNC2 de 1,3 %/an.

12 Denis Babusiaux et Pierre-René Bauquis, *Le Point sur la production des pétroles en mer*, in La revue de l'énergie, n°646, 2019 https://www.larevuedelenergie.com/le-point-sur-la-production-des-petroles-en-mer/.
13 AIE, WEO 2019, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019.
14 Comission européenne, « Recommended parameters for reporting on GHG projections in 2021 », *Draft for consultation in CCC WG2*, 25 juin 2020.
15 Antonin Bergeaud, Gilbert Cette et Rémy Lecat, *Croissance économique et productivité. Un regard sur longue période dans les principales économies développées*, Futuribles, n° 417, 2017, pages 25-39 (https://www.cairn.info/revue-futuribles-2017-2-page-25.htm).

Cependant, cette croissance stable sur la période 2020-2050, avec les évolutions démographiques et de population active évoquées précédemment, revient à une diminution de la productivité horaire prolongeant les observations des dernières décennies.

4.2. Conventions retenues

Les gaz à effet de serre pris en compte dans le présent exercice sont :

- le dioxyde de carbone, CO_2 ;
- le méthane, CH_4 ;
- le protoxyde d'azote, N_2O ;
- les fluorés, HF.

Il n'est pas retenu de facteur majorant pour les « effets non CO_2 » du secteur aérien dans le travail en cours comme recommandé par les choix faits dans la SNBC 2 ou encore par le CITEPA[16]. La raison principale est la difficulté à considérer les effets des autres gaz émis par le transport aérien qui ont des conséquences à des horizons très contrastés.

Le pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre (PRG) considéré est issu de l'*Assessment Report 4* (2007) pour pouvoir se comparer aux exercices précédents. L'horizon de 100 ans est retenu, même si des analyses de sensibilité pourront être réalisées sur des horizons plus proches particulièrement importants, pour le méthane par exemple.

PÉRIMÈTRE TERRITORIAL, COMPTABILISATION DES ÉMISSIONS

La neutralité carbone est calculée sur le périmètre de la France métropolitaine. Le scénario de la SNBC couvre lui le périmètre des inventaires du protocole de Kyoto (Métropole + DROM). La PPE concerne uniquement la Métropole, puisque les zones non interconnectées au territoire métropolitain disposent de lois de programmation énergétique spécifiques. Cela implique des conventions où le champ couvert par les émissions des transports couvre les TOM, mais où les systèmes électriques des TOM sont exclus. Lorsque les comparaisons sont présentées avec le scénario de la SNBC, sauf mention particulière, c'est le périmètre métropolitain qui a été retenu.

Les soutes internationales sont explicitées mais ne sont pas prises en compte dans le calcul de la neutralité carbone, cela pourrait changer dans les futures SNBC.

16 Thamara Vieira da Rocha, Jean-Marc Andra, *État de l'art de la recherche scientifique sur l'impact climatique des trapinées de condensation des avions*, 2021, 33 pages.

2. SOCIÉTÉ, MODES DE VIE, RÉCITS

48 Intégrer les modes de vie aux exercices prospectifs, un enjeu de taille

51 Méthodes d'intégration des dimensions socio-politiques et organisationnelles

56 Les récits des scénarios

59 Références bibliographiques

1. Intégrer les modes de vie aux exercices prospectifs, un enjeu de taille

Quels changements de nos modes de vie les différents scénarios supposent-ils ? Sur quelles valeurs et aspirations reposent-ils ? Lesquelles viennent-ils contraindre ? Comment envisager la transformation des modèles productifs ou des infrastructures de mobilité ? Quelles sont les politiques publiques à approfondir ou à inventer afin d'atteindre l'un ou l'autre des scénarios, pour encadrer et soutenir une transition écologique vers la neutralité carbone ?

De telles questions apparaissent de plus en plus nécessaires à la réflexion prospective. Dans sa construction d'abord, **ces questions visent à affiner les scénarios, à les rendre plus crédibles et à explorer les leviers et les freins que chacun d'eux peut rencontrer**. Dans sa mise à disposition ensuite, ces questions sont également cruciales : la prospective, considérée comme un outil de connaissances, peut alors être utilisable pour la mise en débat public des formes de transition et pour la prise de décision. Ces questions qui explorent différentes facettes des transformations socio-économiques et politiques ouvrent ainsi la possibilité d'élargir les débats sur la transition écologique, en dehors des cénacles technico-économiques. Réunies ici sous l'expression des « modes de vie », elles contribuent **à faire émerger les enjeux de faisabilité et de désirabilité des scénarios de l'ADEME**.

Ce chapitre relate le travail de cadrage et de construction de connaissances, au cours du projet, visant à articuler les dimensions technico-économiques avec des réflexions sur les transformations de la société qu'elles supposent ou qu'elles suscitent.

Il revient d'abord sur les enjeux liés à l'intégration de données liées aux « modes de vie » permettant de comprendre, au-delà des seuls domaines techniques et économiques, la façon dont la structuration de la société participe à éclairer les exercices de prospective. La section suivante décrit les avancées méthodologiques mises en œuvre au cours de l'exercice prospectif afin d'intégrer des dimensions sociale, organisationnelle ou encore politique aux réflexions prospectives. Enfin, cette séquence présente succinctement le récit de chacun des quatre scénarios de l'ADEME.

1.1. Pourquoi considérer les modes de vie ?

En complément des dimensions techniques et économiques, il est de plus en plus fréquent, dans le domaine énergétique et environnemental, que les exercices de prospective intègrent des aspects reflétant les effets des « modes de vie » [1]. Cette facette récente et en développement de la production de connaissances prospectives répond à différents enjeux.

D'abord, au fil du temps, les experts travaillant sur la transition écologique mesurent les écarts entre les échéances climatiques d'un côté et les mesures politiques de l'autre. Deux facteurs expliquent cet écart : d'une part, les réticences à engager des mesures de changement sont nombreuses, qu'elles viennent des décideurs politiques, des citoyens ou des organisations. De ce fait, il devient nécessaire de **considérer les aspirations des individus, les adhésions et réactions qui traversent la société pour envisager la forme, l'ampleur et le rythme des transformations vers un horizon de neutralité carbone**. D'autre part, à mesure que l'on progresse en matière de construction des politiques publiques écologiques, il est possible d'apprécier les résultats des efforts réalisés ces dernières années en matière de transition écologique et de les comparer aux objectifs et aux projections antérieures. Or, les évolutions concrètes en matière de transition écologique ne semblent pas à la hauteur des objectifs fixés.

> Le progrès technique ne semble pas le seul levier à actionner pour envisager la transition écologique.

La mise en valeur de ces écarts montre que **le progrès technique ne semble pas le seul levier à actionner pour envisager la transition écologique**. Par exemple, l'efficacité énergétique n'apparaît pas comme la condition suffisante pour embrasser les défis climatiques. Elle doit être couplée à des approches reposant sur la sobriété des consommations et des pratiques sociales. Ces dernières peuvent également représenter un levier favorable à l'adoption de systèmes techniques économes en énergies, en ressources et moins émissifs. Autrement dit, si la technique comme réponse aux enjeux écologiques a longtemps primé dans la réalisation d'exercices prospectifs, ce solutionnisme technique ne semble plus à même de répondre seul aux objectifs politiques. Il doit s'accompagner d'une réflexion sur le potentiel de transformation des pratiques sociales et des représentations qui sont au fondement de notre modèle productif et de consommation.

Ensuite, **l'intérêt croissant pour les modes de vie participe du souhait de représenter des futurs possibles qui soient plus « réalistes »**. Cet enjeu de réalisme renvoie à deux fonctions différentes données aux dimensions « modes de vie » dans les exercices prospectifs. D'abord, celle de décliner les scénarios ou les modèles prospectifs au niveau des individus et des collectifs qui constituent la société. Ainsi une réflexion en termes de modes de vie traduit des scénarios quantifiés et les incarne dans des personnages ou des profils de ménages, qui permettent d'apprécier leurs effets sur la vie quotidienne. Cela permet de communiquer sur les futurs dessinés par les scénarios prospectifs.

Mais l'intégration des modes de vie dépasse cette seule fonction de communication, offrant des traductions concrètes, autres que chiffrées. Plus profondément, elle renvoie à une transformation par la communauté des modélisateurs et prospectivistes, des leviers et contraintes à considérer pour envisager la transition. Sous cet angle, la dimension « modes de vie » remplit une deuxième fonction, qui est **d'éclairer la place des logiques sociales, économiques et politiques et de les mettre en évidence comme de véritables leviers pour penser les modalités et les rythmes de la transition écologique.**

Les « modes de vie » permettent d'intégrer la complexité des éléments pris en compte dans la prospective, avec *in fine* **l'ambition de rendre les scénarios plus robustes** : au même titre que les enjeux techniques ou économiques font l'objet d'un travail d'expression de contraintes ou de conditions de réalisme, les « modes de vie » représentent une voie fertile afin d'intégrer des connaissances concernant le fonctionnement du corps social et de la société à la construction des scénarios prospectifs.

1.2. Qu'intègre-t-on derrière le terme de « modes de vie » ?

Les prospectives en matière énergétique et climatique intégrant une dimension « modes de vie » travaillent volontiers sur des profils d'individus ou de ménages : ce faisant, elles ont développé des profils et personnages, permettant par exemple de montrer la possibilité d'atteindre le facteur 4 en 2050 en déclinant **une diversité de profils de ménages** sans susciter de rupture brutale dans les modes de consommation et les pratiques sociales (comme cela a été le cas de l'étude [2]).

Au-delà d'approches « photographiques », présentant des instantanés du futur, d'autres exercices de prospective ont cherché à analyser **l'évolution des pratiques sociales** de différents profils de ménages. C'est le cas notamment, en matière de choix alimentaire, de mobilité, d'habitat et de rénovation des logements [3] [4]. Ces trajectoires de transition sont alors abordées *via* **l'évolution des opinions politiques des profils** [3] **et cherchent à caractériser l'évolution de l'adhésion ou des résistances des divers profils de ménages aux transitions**, que ces résistances soient liées à leurs **contraintes économiques et matérielles ou à leurs opinions** en matière environnementale [3] [4].

La réflexion autour des modes de vie conduit également certains scénarios à dépasser l'analyse des seuls ménages, pour mettre l'accent sur **l'évolution des infrastructures** – urbaine, routière, agroalimentaire par exemple. Quoique peu fréquent, ce type de développement permet de se décentrer de la figure de l'individu, isolé, atomisé et dont la seule opinion prévaudrait en matière de transition écologique. En effet, aborder les transformations de la société *via* l'évolution de l'environnement matériel permet de montrer que l'évolution des pratiques sociales des ménages présuppose celle des infrastructures techniques elles-mêmes. C'est alors une fresque plus globale des évolutions de la société qui est brossée [5] (*cf.* [3] en exemple de travail prospectif). Dans cette visée d'élargir la réflexion au-delà des seuls individus et ménages, une autre démarche prospective met en avant – dans le domaine énergétique – les différents futurs possibles en fonction du degré d'autonomie énergétique fixé à l'échelle de la société. Y sont abordés la **redistribution des rôles et des pouvoirs entre les entreprises énergétiques, la place des acteurs publics nationaux et locaux et les modèles afférents de régulation** (centralisés, décentralisés) de production et de consommation d'énergie [6].

La démarche d'intégration des modes de vie dans l'exercice prospectif de l'ADEME s'inscrit donc dans une dynamique de développement de ce type d'exercice dans les scénarios énergétiques, environnementaux et climatiques. Ce tour d'horizon d'exercices prospectifs récents menés en France montre que le périmètre inclus derrière la terminologie de « modes de vie » tend à s'étoffer, à se complexifier. Ce faisant, il requiert une réflexion méthodologique et des dispositifs expérimentaux, exploratoires, permettant de tester différentes manières d'apporter des connaissances issues des sciences humaines et sociales (notamment en sociologie, science politique et histoire) et de les articuler dans les exercices prospectifs. Les méthodes exposées ci-après ont été développées progressivement au cours du présent exercice prospectif.

2. Méthodes d'intégration des dimensions socio-politiques et organisationnelles

Intégrer les modes de vie dans un exercice de prospective n'est pas une évidence. Cette intégration suppose une réflexion sur la possibilité de construire un travail pluridisciplinaire. La prospective, en tant que production de connaissances sur un ou des futurs possibles, suppose de bâtir des méthodologies pour projeter des connaissances du passé ou du présent. Or c'est un exercice dont la sociologie, par exemple, est peu familière. À ce premier défi s'ajoute celui de la modélisation. Dans cet exercice classiquement structuré par des communautés de modélisateurs issus des sciences de l'ingénieur et des sciences économiques, l'intégration d'approches issues des sciences humaines et sociales implique également d'articuler des épistémologies et des pratiques scientifiques très diverses. Simplifications, réductions de la complexité, traduction de connaissances qualitatives en indicateurs et variables quantitatives posent autant d'épineuses questions.

Une telle recherche d'articulation entre sciences humaines et sociales, sciences de l'ingénieur et modélisations économiques suppose un travail d'acculturation de fond. Pour répondre à ce besoin d'intégrer dans l'exercice prospectif des connaissances autour des modes de vie, mais également des formes d'infrastructures techniques et de leur gouvernance, ou encore des systèmes politiques, trois moyens distincts et complémentaires ont été articulés, décrits dans les sous-sections suivantes.

2.1. Le « tendanciel sociétal » et le suivi des hypothèses « sociétales » au cours de l'exercice prospectif

La première brique de méthode pour articuler les enjeux de société aux scénarios technico-économiques repose sur le travail au long cours d'études et de recherches en sciences humaines et sociales, notamment en sociologie. Un travail spécifique réalisé en 2019 y a été ajouté afin d'identifier et d'ordonner des hypothèses structurantes à intégrer concernant les évolutions des modes de vie, mais aussi plus largement des transformations sociales, politiques et économiques en France.

Pour cela, l'ADEME s'appuie d'abord sur les connaissances qu'elle accumule et capitalise, *via* :

- **des enquêtes et études** sur des sujets particuliers, par exemple en 2021 l'étude « Le monde d'après » portant sur la crise sanitaire, ou les études autour du « Grand débat » et du « Vrai débat » sur les opinions des Gilets jaunes en 2019-2020 ;

- **les trois baromètres**, qu'elle mène annuellement (« Les Français et l'environnement », « Représentations sociales du changement climatique ») ou tous les deux ans (« Les Français et les nouvelles technologies de l'énergie »), lui permettent d'analyser les évolutions de l'opinion publique sur le climat, sur l'appréhension du risque climatique, la place des différents systèmes techniques pour y répondre…

Ces diverses études permettent de saisir les opinions actuelles et leurs variations. Elles favorisent aussi l'identification de tendances émergentes en matière de pratiques de consommation ou de nouvelles valeurs et aspirations sur lesquelles s'appuyer pour construire la transition écologique. Elles permettent de distinguer les tendances lourdes en matière d'opinion publique ou de pratiques de consommation. À plus bas bruit, elles saisissent également les remous de l'opinion et les signaux faibles qu'ils peuvent refléter.

Mais le cadre d'un exercice prospectif suppose de retenir certaines données comme étant structurantes dans le travail de projection pour imaginer les scénarios potentiels. Ces derniers se déclinent chacun en modes de consommation mais aussi en organisation sociale, politique et économique différente. L'ADEME a mené un travail avec Futuribles et le CRÉDOC pour décrire un scénario tendanciel « sociétal ». Ce travail détaille les principales évolutions de la société française que l'on peut envisager si les tendances structurantes à l'œuvre aujourd'hui se poursuivent à l'horizon 2035, en l'absence de ruptures majeures. Il s'appuie sur un travail d'analyse prospective de ces principales dynamiques réalisé dans le cadre de 22 « fiches variables », 12 concernant la société française et 10 la consommation.

Figure 1 *Thématiques des fiches variables – scénario tendanciel sociétal*

VARIABLES SOCIÉTÉ

1) Démographie et structure des ménages
2) Logiques de peuplement
3) Usages du temps et activités
4) Fiscalité et redistribution
5) Revenus
6) Cohésion sociale, engagements
7) Rapport au savoir et aux qualifications
8) Sensibilité environnementale et consommation
9) Numérique
10) Santé, bien-être
11) Place de l'État
12) Système productif

VARIABLES CONSOMMATION

1) L'alimentation
2) L'habillement-chaussures
3) L'équipement du foyer
4) Le logement
5) La communication
6) La restauration-hôtellerie
7) Les transports
8) Les loisirs et la culture
9) La santé
10) Les autres biens et services

Sources : ADEME-CRÉDOC-Futuribles.

Chacune de ces fiches retrace les évolutions rétrospectives depuis 15 à 30 ans, identifie une hypothèse tendancielle, puis dégage les tendances prospectives qui prolongent ces évolutions. Elles se fondent sur un triptyque : tendances structurantes, tendances émergentes et ruptures possibles.

À partir d'évolutions d'ordre macrosocial, ce scénario s'intéresse en premier lieu aux moteurs des transformations des comportements individuels, qu'ils soient choisis ou contraints. C'est le cas notamment du vieillissement de la population, de la hausse des inégalités et des incertitudes sur le maintien de l'idée d'un intérêt général. Il n'a donc pas pour ambition d'analyser de manière approfondie les infrastructures, les stratégies des acteurs économiques ou des acteurs publics français et internationaux.

La présence de ce scénario vise à éviter la construction de scénarios technico-économiques « hors-sol », qui reposeraient sur des postulats sociaux irréalistes. Autrement dit, il s'agit de **vérifier, chemin faisant, que les hypothèses au fondement des scénarios, ainsi que leurs résultats, répondent à une exigence de cohérence sur les transformations sociales à moyen terme (2035)**. Au cours du projet, de manière itérative et à mesure que les équipes techniques ont construit leurs données pour alimenter le scénario, des dialogues bilatéraux ont été réalisés en interne par l'équipe projet, ce travail offrant un outil complémentaire pour construire les scénarios.

2.2. Explorer des controverses sociotechniques pour alimenter les réflexions sur les futurs

Dans un contexte marqué par la crise sanitaire, on voit combien les sciences, les développements techniques qui en découlent et leur appropriation sociale sont imbriqués. La seconde méthode pour articuler aux scénarios technico-économiques une exploration de leurs dimensions socio-politiques repose sur l'analyse des controverses. Dans le cadre d'un partenariat avec Sciences-Po Grenoble, un groupe pluridisciplinaire d'étudiants issus du master « techniques, sciences et décisions » (formation pluridisciplinaire en sciences politiques et en sciences de l'ingénieur) a travaillé à l'analyse de différentes controverses sociotechniques.

Trois champs thématiques ont été couverts par le travail d'analyse des controverses :

- l'appropriation sociale des changements de mobilité ;
- biomasse énergie et conflits d'usage des sols ;
- les transitions des modes d'alimentation.

L'exploration de ces thématiques a d'abord permis de dresser un état des lieux des controverses scientifiques, techniques, sociales et économiques telles qu'elles se jouent actuellement : cartographies des enjeux, des débats et de leurs porteurs.

L'exercice a ensuite tenté de « projeter » ces controverses dans certains des scénarios, à l'horizon 2050. Cela permet de mettre en lumière les différences de futurs envisageables autour de secteurs ou d'usages particuliers, en dressant les risques de tensions et de controverses à venir et les besoins de régulation afférente, politique, juridique, économique…

Ces analyses de controverses ont alimenté le travail interne de construction et d'ajustement des scénarios par la mise en évidence des problématiques les plus saillantes, afin de contribuer à nourrir le « fil rouge » de chacun d'entre eux.

L'analyse des controverses sociotechniques permet d'aborder les transformations de la société et les tensions qui peuvent se faire jour sans pour autant

se limiter à une approche centrée sur l'individu. Sans détailler chacune de ces controverses, elles ont permis de mettre en lumière les incertitudes techniques, autant que sociales et politiques, qui caractérisent chacun des scénarios. D'abord, au regard de ce type d'analyse, **les technologies diverses** autour de la production agroalimentaire, mais aussi de la captation et de la séquestration carbone **sont susceptibles de susciter d'importantes controverses** : les communautés scientifiques apparaissent divisées, du fait de débats sur les risques et les promesses des premières et d'un manque de maturité pour les secondes. Les analyses rendent également très saillantes **les questions d'infrastructures** dans la transition dessinées par chaque scénario, infrastructures dont l'accessibilité relative n'est pas sans impact sur les questions de justice sociale et d'équité territoriale. Enfin, les analyses indiquent un **besoin de régulation et de pilotage**, notamment, dans le cas des enjeux biomasse/usage des sols, pour allouer les ressources aux différentes filières et assurer leur coordination.

2.3. Croiser prospective et sciences sociales pour questionner les conditions de faisabilité des scénarios

Étant entendu que les choix technologiques impliquent des modèles variés d'organisation socio-économique et politique, il est nécessaire d'intégrer dans les exercices de modélisation **les contraintes et les possibilités** qui y sont liées. Autrement dit, de mieux articuler les scénarios technico-économiques avec leurs conditions sociales de réalisation afin de **tester les conditions de leur faisabilité**.

2.3.1. Comment mettre en œuvre les différentes transitions incarnées par les quatre scénarios ?

Au regard des dynamiques d'exploration des « modes de vie » mentionnées plus haut, un très vaste champ de variables reste à défricher. Ces dernières peuvent contribuer à améliorer le contenu même de la prospective ou contribuer à sa circulation et sa mise en débat. Multiplier les efforts pour appréhender les transformations socio-économiques et politiques est donc un défi majeur pour la prospective.

L'exploration des dimensions sociales peut viser une meilleure compréhension d'un levier de transition écologique : par exemple, de quelle manière des pratiques de sobriété pourraient être promues à côté de pratiques d'efficacité énergétique ? On peut, entre autres, s'interroger sur les conditions favorables à une réduction de l'alimentation carnée, ou encore sur l'utilisation des transports les plus émissifs. Or, poser cette question d'apparence simple des conditions qui favoriseraient la transformation de pratiques quotidiennes ouvre de multiples perspectives d'analyses. Les outils d'analyses, méthodes et résultats issus de différentes sciences sociales (psychologie, psychologie sociale, mais surtout sociologie et science politique) sur ces nouveaux questionnements appuient ces différentes perspectives d'exploration :

- **une perspective individuelle,** qui analyse les liens entre des comportements et des pratiques sociales d'une part ; des motivations, des habitudes et des opinions d'autre part. Cette perspective, historiquement la plus commune dans la prospective pour traiter des dimensions dites sociales de la transition écologique, est aujourd'hui progressivement complétée et enrichie par les perspectives suivantes ;

- **une perspective plus collective, qui réintègre l'individu dans son environnement socio-politique**. Il s'agit de traiter du rapport des individus aux groupes sociaux auxquels ils s'identifient et auprès desquels ils évoluent : famille, voisinage, pairs, groupes professionnels… Plus largement, cette dimension du lien social entretenu avec un collectif plus vaste – « la société française » par exemple – peut s'analyser en prêtant attention à la transformation des règles, des valeurs, des horizons communs, des formes de participation politique et d'exercice du pouvoir qui consolident ce collectif. C'est alors l'appartenance à des mouvements sociaux, les formes de participation politique locale ou nationale ou les rapports aux institutions et aux corps intermédiaires qui peuvent être observés ;

- **le lien entre individu et collectif passe également par l'étude fine des contraintes économiques et matérielles pour la transformation de ses pratiques sociales**. Nombre d'entre elles sont inscrites dans un environnement économique, technique et social préexistant. Ainsi, les possibilités de réduire les consommations énergétiques de son logement par exemple, ou de faire évoluer ses pratiques de mobilité, sont extrêmement sensibles aux transformations requises pour atteindre la neutralité carbone. Par ailleurs, les marges de manœuvre des individus sont très fortement dépendantes des infrastructures matérielles préexistantes. Cela exige de questionner les conditions matérielles objectives de l'existence : les revenus disponibles, la possibilité ou non de procéder à une rénovation de son logement, l'existence ou non d'alternatives à la voiture thermique offrant un haut niveau de services (transports en commun, mobilité douce, etc.) ;

- **en outre, les modes de vie sont également structurés par des représentations sociales et culturelles partagées**, des imaginaires collectifs qui renvoient au progrès ou à la réussite, pour n'en citer que quelques-uns. De ce point de vue, lutter contre l'étalement urbain, par exemple, suppose de com-

prendre les ressorts du « rêve pavillonnaire » des Français, afin d'envisager des alternatives désirables. Ce qui implique d'analyser non seulement les récits et les discours, mais également les dispositifs institutionnels qui promeuvent un développement fondé sur ces valeurs collectives (exemple des dispositifs d'accession à la propriété) ;

- enfin, cette extension des perspectives de travail consistant à réintégrer les questions de changements de pratiques sociales dans leur matrice économique, sociale et politique, conduit à penser les transformations non seulement de la demande, mais aussi de l'offre. Les travaux en sciences sociales permettent **d'analyser les mécanismes de transformation des filières productives, des outils déployés pour piloter et réguler la transition des acteurs économiques**. Ainsi, d'autres leviers de la transition écologique pourraient être décrits : l'accompagnement de la reconversion de certaines filières, la formation pour constituer de nouvelles filières adaptées, la régulation des émissions et des consommations des activités économiques.

Ces différentes perspectives rapidement brossées ici offrent des pistes d'enrichissement pour affiner et étoffer les exercices prospectifs. Elles sont prometteuses en ce qu'elles permettraient de dépasser l'idée restrictive de « l'acceptabilité sociale » des modifications de nos modes de vie. Elles permettraient également de raisonner en matière de transition de la société, non plus seulement sur une approche centrée sur l'individu, mais sur les mécanismes collectifs de transformation.

2.3.2. Une enquête qualitative administrée sur chacun des quatre scénarios

En complément du travail sur le tendanciel sociétal et des controverses sociotechniques, un dispositif exploratoire de recueil de données qualitatives a été mis en œuvre.

L'ADEME a réalisé avec le cabinet de conseil Auxilia une étude mêlant dimensions prospectives et méthodes d'enquête en sciences sociales pour travailler sur la réception des quatre scénarios. Des entretiens ont été menés auprès de 31 citoyens aux profils variés, sans chercher à avoir un échantillon représentatif de la population française. L'objectif est de surmonter un écueil classique des travaux en prospective, celui de raisonner sur un « individu moyen », qui ne répond à aucune réalité d'observation sociologique. Il s'agit au contraire de partir de **la diversité des situations possibles en fonction des profils, afin d'explorer la perception de chaque scénario par les participants. Ceci permet, à partir d'une réflexion sur la transformation de leurs modes de vie et de leur environnement technique, social et politique, d'identifier les contraintes et les opportunités de transition écologique.**

Pour comprendre les conditions de faisabilité de chacun de ces scénarios, il importe de considérer ce qui participe à les rendre désirables/indésirables, faisables/infaisables aux yeux des citoyens. Comme pour les résultats de la prospective « Paris change d'ère » [3] ou celle d'EPE [4], on peut considérer qu'il est possible de raisonner à partir de deux variables : d'une part l'adhésion à des valeurs pro-environnementales, d'autre part le caractère émissif en gaz à effet de serre ou non des pratiques quotidiennes. Mais pour comprendre le potentiel d'adhésion et d'engagement des citoyens dans l'un ou l'autre des scénarios, il est nécessaire de mettre en lumière plus finement les déterminants de ces deux variables. En effet, ni les valeurs, ni les pratiques ne sont des éléments indépendants que chaque individu serait en mesure de fixer lui-même.

Au contraire, ces deux variables relèvent d'une imbrication complexe mêlant, au niveau des individus, des perceptions et des contraintes matérielles ou encore une circulation des idées politiques à un niveau plus structurel. Pour le dire autrement, au-delà du seul prisme individuel, les individus sont pris dans des structures sociales qui rendent la transition de leurs pratiques tantôt aisée, tantôt difficile, voire impossible.

À ce niveau plus vaste, qui structure largement les « modes de vie », ce sont alors d'autres éléments qu'il s'agit de capter pour tester les conditions de faisabilité des scénarios auprès d'une diversité de profils, l'adhésion ou la réticence des participants. Pour recueillir des données afin de tester les conditions de faisabilité des scénarios et d'entrevoir leurs conséquences potentielles sur une diversité de profils, le dispositif a couvert différents champs d'analyse encastrés les uns dans les autres :

- cette enquête a projeté les participants dans les différents scénarios en 2050 afin de recueillir des données sur **les contraintes et opportunités matérielles, économiques et sociales que les individus rencontrent dans chaque scénario**. Celles-ci sont liées aux revenus disponibles, à la présence de transports en commun, à la situation de propriétaires ou de locataires, à la situation familiale, etc. Pour approcher la diversité des participants, leur recrutement comme le protocole d'enquête ont prêté attention à l'état de leurs opinions en matière de changement climatique, à leurs positions politiques, à leurs aspirations et aux valeurs qu'ils prônent ;
- dans chaque scénario, le protocole d'enquête a été attentif **aux infrastructures techniques qui distribuent des ressources et cristallisent des formes d'organisation à moyen et long terme**, tels que les

réseaux numériques, de production d'énergie ou de transports. Ces infrastructures cadrent lourdement les modes de production mais également les pratiques des individus et pèsent donc favorablement ou défavorablement dans la transition vers des pratiques plus vertueuses. À ce titre, l'enquête a cherché à recueillir les représentations des participants, selon qu'ils habitent de grands centres urbains, des villes moyennes ou des zones plus rurales ;

- enfin, le dispositif a prêté attention **aux formes de régulation politique et économique envisageables pour réduire ou atténuer ces fractures** : par exemple, politiques et outils de soutien à certains secteurs, fiscalité, politique redistributive ou réglementation. Les dispositifs de soutien au développement de pratiques plus vertueuses, tous secteurs et individus confondus (réglementation pour la structuration des filières de réemploi, dispositif de soutien aux pratiques de rénovation des bâtiments, etc.) sont envisagés comme des données d'entrées du protocole. L'objectif est de recueillir les points de vue des participants sur les transformations politiques et économiques sous-jacentes à chacun des quatre scénarios.

À travers ces différents niveaux d'analyse, il s'agit de questionner les transformations quotidiennes que les participants sont prêts à accepter, mais également à quelles conditions plus générales ils pourraient le faire. Autrement dit, au-delà de leur propre quotidien, ce dispositif tente d'appréhender les conditions sociales de la transition, en articulant la faisabilité individuelle des changements de pratiques qu'implique chaque scénario et le contexte collectif correspondant. Par exemple, des participants peuvent juger acceptables certaines modifications dans leurs pratiques à condition que les efforts soient équitablement répartis au sein de la population ; ou encore, à condition que leur soient garanties des marges de manœuvre et une autonomie en termes de pratiques émissives de CO_2.

L'enjeu de ce dispositif était donc d'envisager les données ayant trait au contexte collectif pour nourrir les réflexions sur les conditions sociales de réussite des scénarios. Il a tenté de soulever leurs lots de contraintes vis-à-vis de différents profils de Français, les risques que chacun d'entre eux comporte en termes de fractures sociales. Inversement, ce type de dispositif vise aussi à envisager les cobénéfices de la transition. En effet, chaque scénario de transition écologique pourrait promouvoir de nouvelles formes de collectifs, de nouvelles valeurs, de nouvelles organisations à même de consolider un horizon désirable, non seulement écologiquement, mais également d'un point de vue social, économique et politique.

Compte tenu des délais de réalisation de ce travail, il n'est pas possible d'intégrer ici les résultats qualitatifs, qui feront l'objet d'un feuilleton spécifique.

3. Les récits des scénarios

3.1. Pourquoi des récits ?

L'utilisation de récits permet aux publics non scientifiques d'appréhender des enjeux complexes et abstraits, discutés dans des termes experts. La communication scientifique apparaît aussi plus efficace sous forme narrative lorsque ces récits utilisent un langage qui reflète les préoccupations du public. Concernant le changement climatique, il est particulièrement crucial de communiquer autour de phénomènes complexes et enchâssés. Utiliser un récit signifie décrire le problème, développer ses conséquences et parler des solutions. Cette structure du récit permet d'éviter que le public soit inhibé mais qu'il puisse au contraire se sentir en capacité d'agir. Le modèle ABT décrit ci-dessous est l'une des manières d'y parvenir.

Pour les publics scientifiques, c'est aussi une manière complémentaire de communiquer des travaux scientifiques, de les rendre plus facile à mémoriser et à travailler, notamment par rapport aux formes traditionnelles de communication scientifique [7]. Le GIEC utilise des « narratives » (récits, ou SSP – *Shared Socioeconomic Pathways* – décrits précédemment ; voir chapitre *1.1. Ambitions, objectifs, méthodes*) depuis maintenant une dizaine d'années.

Au-delà de ses vertus de communication, la construction des récits est particulièrement complexe, car elle suppose un retournement des perspectives. Là où les scientifiques et experts découpent le réel en différents paramètres, en différents secteurs, le récit vise à retrouver simultanément ces éléments pour les donner à voir dans une appréhension des transformations globales de la société. Là où les variables techniques peuvent ne pas être parlantes, le récit vise à offrir une vision intégrée de la trajectoire prise par la société dans chacun des scénarios. Il s'agit d'incarner, de mettre en musique des variables qui ont été analysées et travaillées de manière partiellement distincte, par chaque champ d'expertise sectorielle. En cela, le récit est le pendant qualitatif du travail de modélisation qui permet d'interfacer les différents champs d'expertise.

Figure 2 *Présentation du modèle ABT pour la mise en récit*

DE LA THÉORIE À LA PRATIQUE

Utiliser le modèle ABT pour transformer votre message en un récit

La partie **« And »** (« et ») de l'histoire est l'exposition, la partie **« But »** (« mais ») apporte la tension, et la partie **« Therefore »** (« donc ») fournit la résolution. Vous trouverez ci-dessous un exemple, fourni par l'un des auteurs de ce manuel, d'une histoire personnelle sous forme de récit.

En tant que parent de deux garçons, j'ai toujours aimé pouvoir partager avec eux les expériences et les activités que j'aimais quand j'étais enfant et voir la joie sur leurs visages quand ils courent dans la mer par une chaude journée d'été, ou quand ils lancent des boules de neige en hiver.

***And* (et)**

Je trouve un grand réconfort dans le fait de savoir que nous faisons partie d'une chaîne ininterrompue qui relie les générations passées et futures.

***But* (mais)**

En les élevant, j'ai vu le changement des saisons être perturbé et j'ai vécu cela comme une remise en question très profonde de ma propre représentation du bien-être et de ma vision de ce qu'est un bon père.

***Therefore* (donc)**

J'ai donc pris la décision, assez tard dans ma vie, d'apprendre ce que je pouvais sur ce qui se passait et ce que je pouvais faire pour y remédier. Je suis donc retourné à l'université, j'ai étudié les sciences sociales du changement climatique et je suis maintenant devant vous.

Dr Chris Shaw (chercheur senior, *Climate Outreach*), traduit par nos soins.

3.2. Scénario 1 : une transition opérée grâce à la sobriété

La trajectoire historique de demande énergétique en croissance continue, générant des impacts toujours plus importants sur les ressources et l'environnement, est inversée grâce à des innovations organisationnelles et comportementales plus que technologiques. Des transformations importantes dans les façons de se déplacer, se chauffer, acheter et utiliser des équipements, peuvent contribuer à améliorer le niveau de vie et atteindre la neutralité carbone sans impliquer de technologies d'émissions négatives non éprouvées et incertaines.

La transition est conduite principalement grâce à la sobriété : réduction de la demande d'énergie, de matières et de ressources. Cette approche s'inscrit dans une vision globale dans laquelle la question climatique est structurante mais ne résume que partiellement la question écologique. Le chemin emprunté vise à limiter les externalités ou les déplacements de pollution. En agissant à la source, les émissions liées aux usages sont réduites rapidement et le report ou le déplacement d'impact sont évités. Le rapport à la nature est repensé : on la respecte en tant que telle, elle est presque sacralisée. Les mesures sont contraignantes pour une part significative (obligations, interdictions, quotas…), ce qui ne veut pas forcément dire autoritaires. En effet, la participation et la délibération collective autour de ces seuils et limites sont centrales dans leur définition et leur appropriation à l'échelle des territoires.

Mais faute de transformations plus structurelles sur l'offre énergétique notamment, certaines évolutions peuvent apparaître comme des contraintes fortes pour une partie de la population considérant que la question climatique se résume à une question de finalité plutôt que de moyens. En outre, au-delà des premiers gains sur la baisse de la demande, dans le processus de transition, la lenteur de la transformation de l'appareil productif ou des infrastructures peut conduire à des situations de blocage ou de dépendance à des infrastructures carbonées.

Par conséquent, l'intensité des mesures de sobriété (concernant les logements vacants, les résidences secondaires, les vols intérieurs...) est forte mais construite sur une objectivation de l'impact de ces mesures dans une vision égalitaire de la transition. Dans ce monde, un des principes est : « ce n'est pas parce que j'ai les moyens de le faire que je peux le faire ». Les normes et valeurs ont évolué, favorisant une économie du lien plus que du bien et très ancrée sur les territoires et leurs ressources. Les liens avec les autres territoires, notamment les dimensions internationales, ne sont pas toujours évidents, dans un monde où le référentiel devient systématiquement le local, par opposition au global.

3.3. Scénario 2 : une transition concertée plus respectueuse de l'environnement

Le système économique évolue progressivement vers une voie durable, mettant l'accent sur un développement plus inclusif qui respecte et se réintègre dans les limites environnementales. Avec la prise en compte des aspects sociaux, culturels et économiques de la dégradation de l'environnement et des inégalités, ce changement est conduit en traitant de manière équilibrée différentes questions. Ainsi organisations non gouvernementales, institutions publiques, secteur privé et société civile trouvent des voies de coopération pragmatique. Des institutions sont créées à cette fin et la nature est protégée et même institutionnalisée.

Les incitations financières, avec politiques et réglementations fondées sur des critères sociaux et environnementaux, ainsi que l'évolution des paradigmes permettent des investissements massifs dans les solutions de sobriété, d'efficacité et d'énergies renouvelables, comme dans le renouvellement et l'adaptation des infrastructures en place. La consommation s'oriente vers une faible croissance matérielle, moins consommatrice de ressources et d'énergie. Ce scénario constitue une rupture avec l'histoire récente dans ses préoccupations environnementales et sociales, sa sensibilité accrue à l'environnement et une évolution progressive vers des modes de vie plus sobres.

Mais la volonté de traiter l'ensemble des sujets en même temps et avec l'ensemble des acteurs peut freiner la transformation des systèmes productifs et des modes de vie. Cette transformation nécessitera

un changement d'échelle quant aux ressources humaines et financières à mobiliser. Tout l'enjeu est de réaliser ce changement d'échelle à temps.

Les changements de politique sont motivés par la pression de la société civile et la coalition de parties prenantes trouvant des intérêts convergents. L'accent mis sur l'équité et la fin de la croissance économique en tant qu'objectif mène les pays industrialisés à soutenir les pays en développement, en donnant accès à des ressources humaines et financières sans commune mesure avec ce qui a pu être réalisé jusqu'alors.

3.4. Scénario 3 : une croissance verte accompagnée par l'État

Le développement technologique est perçu comme une planche de salut et la meilleure réponse aux défis environnementaux. Il progresse rapidement, mais pas toujours dans les délais nécessaires. La dépendance aux énergies fossiles diminue lentement, ce qui implique un besoin de développer des technologies de réparation (captage et stockage de CO_2) en conséquence.

C'est une voie dynamique dans laquelle le découplage entre création de richesses et impacts environnementaux ou consommation de ressources constitue toujours la ligne d'horizon… même s'il ne s'observe qu'à des échelles nationales et non globales. Les meilleures technologies sont déployées sur des marchés porteurs (exemple : les grandes villes des pays industrialisés), parfois soutenues par des régulations et cadres d'innovation forts avant d'être déployées largement et généralisées aux autres populations solvables. La mise en valeur du capital naturel permet de mieux préserver la nature car c'est en lui donnant un prix que l'on espère trouver les solutions techniques pour la protéger.

Ce scénario n'est pas une simple extrapolation des tendances récentes, mais plutôt un développement cohérent avec les modèles historiques. Les économies émergentes se développent relativement rapidement puis ralentissent à mesure que les revenus atteignent des niveaux plus élevés. Le progrès technologique se diffuse et se poursuit sans ralentissement majeur ni accélération. Social, économie et développement technologique ne s'écartent pas significativement des tendances historiques. Les institutions nationales progressent lentement vers les objectifs de développement durable. Les inégalités de revenus se réduisent lentement, ce qui maintient la vulnérabilité des populations aux changements sociétaux et environnementaux.

3.5. Scénario 4 : une croissance et des modes de vie préservés par le progrès technologique

Poursuivant le modèle économique intensif en ressources et en matière, les acteurs placent leur espoir dans l'innovation et le progrès technique pour maîtriser l'impact sur l'environnement des activités humaines, en se concentrant sur la question des émissions de CO_2. Plutôt que de chercher à transformer les systèmes productifs et les modes de vie, on s'efforce de réparer les dégâts causés par des développements exacerbés, quitte à y dédier toute une infrastructure.

Une croissance économique rapide est donc maintenue globalement dans le monde, ce qui n'est plus le cas dans les pays industrialisés. La confiance est forte dans la capacité à gérer les systèmes sociaux et écologiques avec plus de ressources matérielles et financières. Les enjeux écologiques locaux (pollution, bruit, biodiversité…) sont traités *via* des solutions techniques, mais la perception des contreparties entre progrès économique et impacts environnementaux limite les efforts consacrés aux enjeux globaux du réchauffement climatique. Plutôt que de remettre en cause un modèle économique basé sur la production et la consommation de masse, on recherche des moyens ciblés de traiter les défis écologiques de ce milieu du XXIe siècle, notamment en investissant largement sur la technologie de captage du CO_2. Cependant, même en consacrant des moyens importants et coordonnés, la gouvernance d'une solution massive comme le captage et le stockage du CO_2 pose des questions géopolitiques nouvelles que les seules richesses supplémentaires ne peuvent suffire à traiter.

La mondialisation s'accélère, avec une amélioration des actions menées par les institutions au bénéfice des populations les plus en difficulté et une meilleure coopération sur ce sujet central et ciblé du CO_2. Il existe peu d'exemples passés de telles tendances. Néanmoins, deux dynamiques récentes sans précédent suggèrent cette possibilité d'une rupture avec les tendances passées :

- l'émergence d'une classe moyenne mondiale qui pourrait contribuer à une croissance robuste de la production/consommation de biens et de services et pourrait aussi générer une pression pour l'amélioration des institutions ;
- la révolution numérique qui, pour la première fois dans l'histoire humaine, favorise l'émergence d'un discours global d'une fraction significative de la population.

Avertissement au lecteur : les récits, tels que reflétés dans ce chapitre, s'écartent parfois des scénarios finaux présentés dans la synthèse.

4. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **Mathieu Saujot et Henri Waisman**, *Mieux représenter les modes de vie dans les prospectives énergie-climat*, IDDRI, Étude n° 02/20, 2020, 42 pages.

[2] **ADEME**, *Énergie Climat 2030/2050 – Quels modes de vie pour demain ?*, ADEME, 2014, 153 pages.

[3] **Elioth, Egis Conseil Bâtiments, Quattrolibri et Mana**, *Paris change d'ère, vers la neutralité carbone de Paris en 2050*, Ville de Paris, 2017, 370 pages.

[4] **EPE**, ZEN 2050 – *Imaginer et construire une France neutre en carbone*, 2019, 88 pages.

[5] **ADEME**, *Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité. L'apport des sciences humaines et sociales pour comprendre et agir*, 2016, 183 pages.

[6] **Debizet *et al.***, *Scénarios de transition énergétiques en ville. Acteurs, régulations, technologies*, La Documentation française, 2015, 197 pages.

[7] **Adam Corner *et al.***, *Principles for Effective Communication and Public Engagement on Climate Change: A Handbook for IPCC Authors*, Climate Outreach, 2018.

3. ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

61 Adaptation et atténuation, les deux faces d'une même pièce

64 Une accélération des changements, annoncée depuis 1989

69 La gouvernance et le rôle de la technologie au cœur des scénarios

76 Références bibliographiques

1. Adaptation et atténuation, les deux faces d'une même pièce

POURQUOI INTÉGRER L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS UNE PROSPECTIVE ÉNERGIE-RESSOURCES VISANT LA NEUTRALITÉ CARBONE ?

La compréhension de l'adaptation a beaucoup évolué depuis sa reconnaissance comme une réponse aux changements climatiques par le GIEC dans les années 1990. Initialement les deux « réponses » pour lutter contre le changement climatique, l'atténuation et l'adaptation, ont été présentées de manière distincte. Cela se justifiait par le fait que la première s'attelle aux causes et la seconde aux conséquences. Cette nette séparation a eu une influence significative sur le manque de reconnaissance et le déficit de légitimité de l'adaptation face à l'atténuation dans le débat politique. Très vite, reconnaître la nécessité de s'adapter est considéré comme un aveu d'échec quant à notre capacité d'empêcher le réchauffement global. Mais ces définitions, somme toute théoriques, n'ont pas résisté à la mise en œuvre d'actions concrètes au profit d'une vision intégrée de la lutte contre le changement climatique. S'adapter au changement climatique et lutter contre celui-ci sont les deux faces d'une même pièce.

Où que l'on se trouve, le climat influe sur l'environnement du territoire (faune, flore…), les ressources naturelles disponibles (eau, sols, énergie…) et les conditions de production du secteur primaire (agriculture, sylviculture), les conditions d'existence et les besoins des populations (chauffage, rafraîchissement, protection contre les intempéries, etc.). Tout comme, dans bien des cas, il influe sur la nature des activités économiques ou les conditions dans lesquelles elles sont menées. En cela, l'adaptation au changement climatique interconnecte des problématiques sociales, environnementales, économiques et climatiques.

- **Économie** : face aux risques pesant sur les infrastructures, sur les approvisionnements en ressources (eau, sols, énergie, ressources agricoles et forestières) ou sur la santé des personnes, il s'agira de s'adapter à l'évolution climatique tout en créant de la valeur dans une économie bas carbone.

- **Modèle social** : dans la mesure où les territoires, les habitants et les organisations ne présentent pas tous la même vulnérabilité face au changement climatique, l'équité et la solidarité entre territoires et entre générations sont un marqueur fort : elles traduisent l'effectivité et la qualité de l'adaptation de la France au changement climatique dans une approche inclusive.

- **Environnement** : le changement climatique entraînera des évolutions des cadres de vie, des paysages et des aménités de notre environnement, auxquelles il faudra s'adapter pour garantir la santé et le bien-être des habitants.

Tout comme l'intégration d'un chapitre sur les modes de vie participe du souhait de représenter des futurs possibles qui soient « traduits » dans le quotidien, la dimension « adaptation au changement climatique » est désormais un élément incontournable de l'exercice prospectif, avec l'ambition de rendre nos scénarios cohérents avec les changements annoncés du climat. L'objectif de ce chapitre est de présenter des futurs robustes face aux menaces qu'il présente, c'est-à-dire des sociétés qui ont conservé leurs fonctionnalités sociales, économiques ou culturelles, en composant de façon différente avec les aléas climatiques.

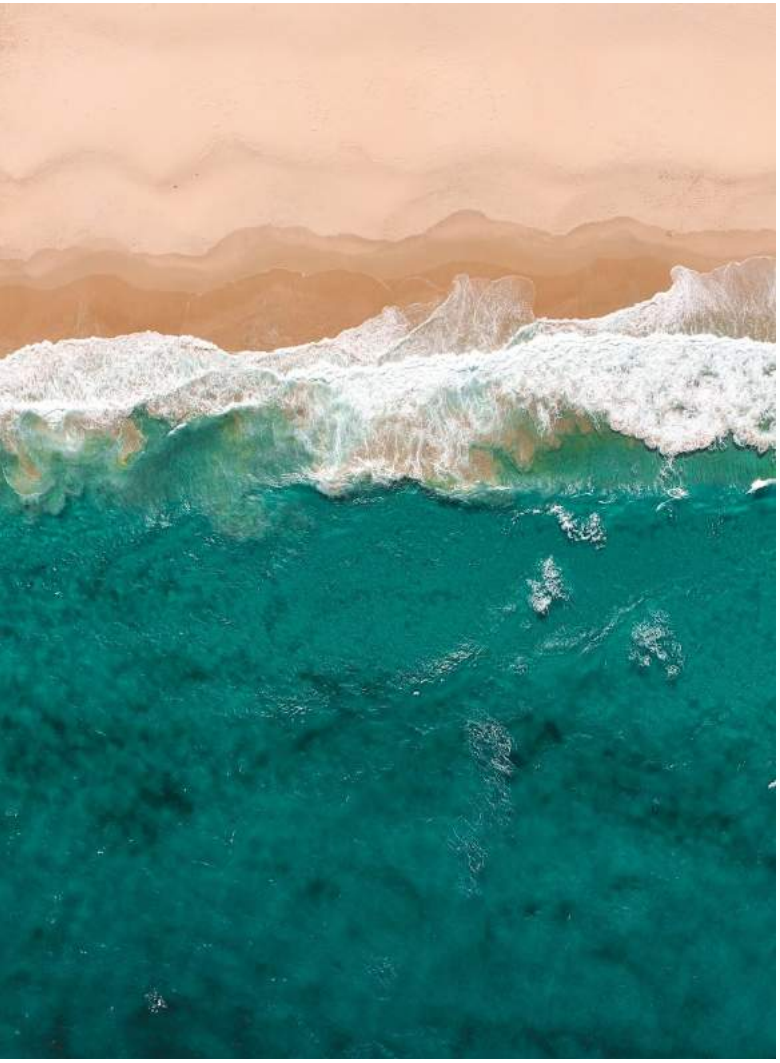
QU'INTÈGRE-T-ON DERRIÈRE LE TERME « ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE » ?

Intégrer les impacts futurs du changement climatique dans un exercice prospectif n'est pas une évidence. Cela suppose de croiser l'exposition future de la France à la sensibilité des différentes briques ou secteurs étudiés. Alors quelle sera l'exposition de la France en 2050 ?

Pour les 20 à 30 prochaines années qui nous intéressent dans ce projet, les évolutions du climat ont déjà été enclenchées par les gaz à effet de serre émis jusqu'à présent. Les principaux impacts du changement climatique en France sont donc non seulement déjà observés, mais leur évolution attendue à 2050 est relativement bien caractérisée (*cf. section 2* ci-dessous). Étant donné l'inertie climatique, les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre, s'ils sont suffisants, permettront au mieux de stabiliser les évolutions climatiques au-delà de 2050. S'il est primordial de maintenir la hausse des températures moyennes mondiales en dessous des + 2 °C, voire du + 1,5 °C, c'est qu'au-delà, l'ampleur et l'imprévisibilité des impacts peuvent être telles qu'il sera difficile de définir des trajectoires d'adaptation.

Néanmoins, **l'élévation des températures au-delà de 2050 n'est pas totalement inéluctable, car elle dépend fortement des choix de société que nous faisons aujourd'hui**. Depuis 2008 au moins, les scientifiques nous informent que des émissions de CO_2 nulles et une décroissance des émissions des autres GES devraient permettre la stabilité des températures dans le futur [1]. Cette affirmation est réitérée dans le volume 1 du 6e rapport d'évaluation du GIEC. À l'inverse, un monde où les concentrations actuelles des GES dans l'atmosphère resteraient constantes conduirait à un réchauffement continu.

Cette vision optimiste est cependant à nuancer : tous les impacts climatiques ne cesseront pas de s'aggraver dès lors que les températures seraient stabilisées dans un monde sans émission. La fonte des glaciers et l'élévation du niveau de la mer sont ainsi décalées dans le temps par rapport au réchauffement. Une élévation supplémentaire du niveau de la mer d'au moins 80 cm semble déjà « actée » sur le long terme (au-delà de 2100) et pourrait perdurer pendant des siècles, y compris dans un monde sans émission [2]. Les deux scénarios d'émissions les plus basses du GIEC 2021 donnent une fourchette allant de + 40 cm à + 1 m à l'horizon 2150 [3].



L'horizon de milieu du siècle est retenu ici en cohérence avec l'objectif de cet exercice prospectif, à savoir la neutralité carbone à atteindre d'ici 2050. Mais travailler à cet horizon est, à bien des égards, insuffisant au regard des transformations environnementales causées par les évolutions climatiques locales : réchauffement des océans entraînant un recul du trait de côte, évolution, déplacement voire disparition de la faune et de la flore, ressource en eau, dégradation des services écosystémiques rendus par les sols, etc. Des échelles de temps beaucoup plus longues sont à considérer (de l'ordre du siècle et au-delà).

COMMENT PRENDRE EN COMPTE LES IMPACTS FUTURS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Le véritable enjeu de l'adaptation au changement climatique est de savoir anticiper : **tisser une relation au futur et renforcer notre capacité à s'y projeter collectivement**. Cette culture de l'anticipation des effets du changement climatique est un cadre d'analyse systémique qui redéfinit les conditions d'exercice des politiques publiques de toute sorte. Quel que soit le sujet (réglementation thermique des bâtiments, adéquation à long terme des capacités de production énergétique, aménagement du territoire, gestion des infrastructures, production agricole et forestière, etc.), l'analyse doit prendre en compte les problèmes que les effets du changement climatique risquent d'aggraver comme le confort d'été, la variabilité de la demande en énergie, les risques sur les infrastructures, la variabilité de la production de biomasse, etc. Aux côtés des enjeux techniques ou économiques, les contraintes, conditions de réalisation et hypothèses climatosensibles sont donc des éléments de complexité supplémentaires mais incontournables dans la construction de futurs alternatifs. Ces questionnements ont été intégrés dans nos chapitres sectoriels même si la complexité des phénomènes en jeu exige que l'on approfondisse encore les connaissances sur les impacts.

Dans ce chapitre, une approche « photographique » présentant des instantanés du futur et s'appuyant sur le chapitre *1.2. Société, modes de vie, récits* vient compléter ces analyses.

L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE MISE EN QUESTION DE NOTRE RAPPORT À LA NATURE ?

Le changement climatique est intrinsèquement lié à deux autres enjeux des prochaines décennies :

- **la préservation de la biodiversité :** les impacts du changement climatique, souvent aggravés par les pratiques humaines, affectent les écosystèmes sur des échelles de temps très courtes. Or ces écosystèmes fournissent des « services » et jouent un rôle majeur dans les cycles du carbone, de l'azote ou de l'eau. Traiter séparément les deux sujets, comme cela a été largement le cas jusqu'à présent, risque de compromettre notre capacité à stopper avec succès le changement climatique tout en préservant les écosystèmes ;

- **l'artificialisation des sols** : nos ambitions en matière de changement climatique et de biodiversité nécessitent une attention particulière à l'utilisation des terres. Les sols non artificialisés ont en effet une fonction régulatrice (températures, cycle de l'eau, stockage de carbone), dont l'importance est accentuée par le changement climatique. Ils sont aussi à la base du système alimentaire. Ils seront partiellement traités ici *via* la problématique d'aménagement du territoire.

Ces enjeux sont primordiaux et difficiles à appréhender dans leur globalité. La mise à l'épreuve de nos organisations lors de la crise de la Covid-19 démontre la complexité de nos relations avec les écosystèmes, et les conséquences à de multiples échelles que leur évolution peut générer. Ainsi, le changement climatique que nous connaissons et subissons maintenant de manière accélérée nous force à requestionner et à expliciter notre rapport à la nature.

2. Une accélération des changements, annoncée depuis 1989

Le changement climatique se mesure *via* l'évolution de caractéristiques physiques de l'environnement. Les évolutions déjà observées et celles attendues en France à l'horizon 2050 sur quelques caractéristiques physiques représentatives sont présentées dans le ***Tableau 1*** et montrent une accélération des changements.

Tableau 1 *Évolutions observées et attendues en France à l'horizon 2050 de différentes caractéristiques physiques de l'atmosphère, des terres et des mers*

	ÉVOLUTIONS DÉJÀ OBSERVÉES EN 2021	ÉVOLUTION AUJOURD'HUI > 2050
Température moyenne en France	• + 1,7 °C depuis 1900[1]	• + 2,2 °C (comparaison avec la période 1976-2005) Cette moyenne traduit par exemple : • 5 à 15 jours de vagues de chaleur en plus • des canicules avec des pics à plus de 50 °C • des risques de feux de forêt élevés sur la majorité du territoire • jusqu'à 50 nuits par an au-dessus de 20 °C sur les régions méditerranéennes (10 à 20 nuits sur la moitié nord de la France) • 10 à 20 jours par an de gel en moins
Humidité des sols en France	• Augmentation de la surface des sécheresses (5 % dans les années 1960 à environ 15 % de nos jours)	• Diminution accélérée de l'humidité moyenne des sols sur l'ensemble de la France métropolitaine • En moyenne, la période où les sols sont secs doublerait (allongement de 2 à 4 mois) • Périodes de sécheresse plus longues en été (jusqu'à 5 à 10 jours supplémentaires) • - 10 % de cumuls de pluie en été
Précipitations intenses	• Augmentation de la fréquence des précipitations intenses et de la quantité d'eau lors de ces épisodes	• Les pluies actuellement les plus intenses pourraient augmenter en intensité (+ 15 % à 25 %) et arriver 2 fois plus souvent
Niveau global[2] des mers et océans, température et pH	• Niveau des mers : + 8 cm en 30 ans • Acidification : le pH a diminué de 0,1 par rapport au début du XXe siècle • Température de surface en Méditerranée et Atlantique : + 0,3 °C à + 1 °C, plus de 2 vagues de chaleur marine annuelles	• Niveau : + 20 cm à + 60 cm par rapport à 2015 • Acidification et désoxygénation s'accentuent • Température de surface des mers augmentant de 1 °C à 2 °C, davantage de vagues de chaleur marine
Volume des glaciers en France métropolitaine	• Variation d'épaisseur en moyenne nationale : - 19 m • Glaciers alpins : - 25 % en volume	• Risque de disparition des glaciers pyrénéens. • Glaciers alpins : - 50 % en volume par rapport à 2015 • - 20 % à - 50 % d'épaisseur de neige en moyenne montagne

Source : Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique ; Agence européenne de l'environnement ; Météo-France, actualisation 2020 des projections climatiques ; GIEC, rapport 2021.

1 La dernière décennie a été plus chaude que n'importe quelle période climatique durant toute l'histoire de l'humanité. Le XXIe siècle entre donc dans un inconnu climatique de toute l'histoire humaine.
2 Concerne l'ensemble du globe.

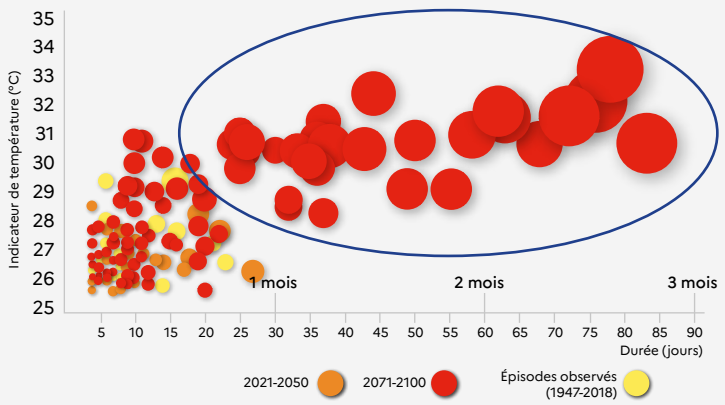
On peut remarquer que dès son premier rapport en 1989, le GIEC avait simulé l'évolution des températures maintenant observées. Au fur et à mesure de ses rapports, le GIEC a confirmé les évolutions attendues dans les prochaines décennies, en affinant progressivement la modélisation des interactions entre les écosystèmes et notamment les effets de rétroaction.

L'évolution des conditions climatiques se traduit en tendance de fond, par exemple la hausse des températures ou du niveau des mers, et en redistribution des événements météorologiques extrêmes, par exemple des vagues de chaleur plus précoces, plus intenses et plus longues. Le ***Graphique 1*** représente une simulation des vagues de chaleur qui pourraient survenir en France métropolitaine au cours du XXIe siècle, soit un véritable changement de régime des conditions météorologiques.

Le ***Graphique 2*** montre que les évolutions climatiques sont déjà enclenchées jusqu'en 2040 dans tous les scénarios envisagés à moyen terme. Cependant, le milieu du siècle présente une véritable bifurcation des scénarios, entre l'emballement dans le scénario tendanciel ou la stabilisation dans un scénario bas carbone compatible avec le scénario du GIEC à + 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle.

Étant donné l'inertie climatique, la décennie 2020-2030 est cruciale pour mettre en place une décarbonation effective de nos appareils productifs, tout en anticipant les conditions climatiques dans lesquelles ils opéreront.

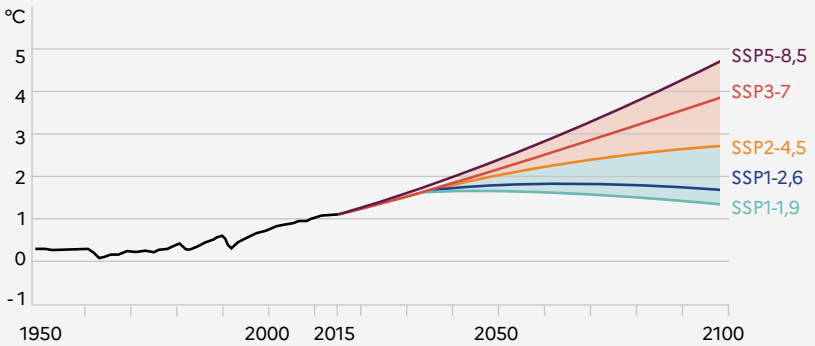
Graphique 1 *Simulation des vagues de chaleur, en durée et en température, au cours du XXIe siècle.*



Taille de la bulle : sévérité de la vague de chaleur (chaleur cumulée).
N.B. : ces vagues de chaleur (durée de 1 à 3 mois) apparaissent à la fin du XXIe siècle dans un scénario sans réelle politique climatique. Elles pourraient survenir 3 années sur 4.

Source : Météo-France – Climat HD.

Graphique 2 *Simulation des températures moyennes mondiales, pour les différents scénarios d'émissions de GES : fortes réductions des émissions stabilisant les températures sous + 2 °C (en bleu) ; scénario sans véritable politique climatique conduisant à un emballement sur les prochains siècles (en rouge)*



Source : GIEC 2021.

2.1. Risques plus forts et plus complexes sur la période 2020-2050

Les risques climatiques vont évoluer dans la période 2020-2050, en se renforçant ou se complexifiant. Les grandes catégories de risques sont présentées dans le *Tableau 2* : ils sont générés par les aléas climatiques eux-mêmes, mais sont aussi influencés par les caractéristiques de notre environnement (topographie, géologie, aménagements), par les infrastructures ou par d'autres facteurs socio-économiques qui peuvent contribuer à amplifier ou cumuler les aléas.

Tableau 2 *Grandes catégories de risques climatiques*

Impacts du changement climatique	Risques nécessitant des actions de long terme (recherche, observation, investissements, etc.)
Évolution des températures moyennes (air, eau)	• Modification du fonctionnement des écosystèmes : précocité de la floraison (d'où un impact croissant des gels de mars-avril), composition des populations vertébrées et invertébrées. • Impacts sanitaires (allergies, maladies infectieuses, stress psychologique, toxicité des polluants chimiques accrue avec la température, etc.). • Feux de forêt étendus à tout le territoire, aggravés en période de canicule et de sécheresse.
Canicule	• Enjeux sanitaires pour les humains et animaux : une large population est sensible à ces risques, étant donné la durée des vagues de chaleur qui peut parfois se conjuguer avec des taux d'humidité importants. • Pertes de rendement de culture, impacts sur les écosystèmes et la forêt.
Manque d'eau	• Asséchement chronique des sols et sécheresse aiguë, conduisant à des stress hydriques pour les écosystèmes et à une diminution de la quantité et de la qualité de l'eau dans ses différents usages. • Stocks de carbone fragilisés : sécheresse et feux de forêt peuvent conduire à une forêt qui soit émettrice nette de carbone.
Variabilité du climat	• La variabilité du climat est plus marquée, à toutes les échelles de temps (au cours d'un mois ou entre deux années). Cette variabilité contribue au stress des espèces végétales et aux moindres rendements. La variabilité accrue des récoltes, d'une année sur l'autre, accentue les risques économiques.
Tempêtes et cyclones	• Augmentation probable de l'intensité des cyclones les plus puissants. • En France métropolitaine, même si les évolutions de l'intensité des tempêtes sont incertaines, les inondations et submersions induites par les tempêtes sont accentuées.
Inondations, pluies extrêmes	• Les pluies extrêmes restent un aléa majeur qui s'accentue avec le changement climatique, susceptibles d'entraîner selon les cas des inondations par crue ou par ruissellement (événements extrêmes les plus coûteux actuellement en France).
Érosion et mouvements de terrain	• La variabilité du climat et les événements intenses plus fréquents contribuent à l'érosion des sols. • Le dégel du permafrost en haute montagne menace la stabilité des sols et des infrastructures comme les remontées mécaniques par exemple.
Retrait-gonflement des argiles	• L'alternance de sécheresses et de pluies intenses entraîne des mouvements des couches argileuses qui fragilisent bâtiments et infrastructures.
Acidification des océans	• Mortalité des récifs coralliens, protecteurs des littoraux (la France abrite 10 % des récifs coralliens mondiaux).
Élévation du niveau de la mer	• Submersion marine, érosion du littoral (en 2021, environ 20 % du trait de côte naturel est en recul).

2.2. Des stratégies qui varient selon le rapport à la nature et les rapports sociaux

Il est nécessaire de prendre en compte les évolutions climatiques et leurs impacts environnementaux dans les scénarios technico-économiques afin d'en tester les conditions de faisabilité. Cette analyse est menée dans les différents chapitres sectoriels où les hypothèses climatosensibles sont identifiées, dans la limite des connaissances établies à l'heure actuelle. Ainsi, dans les secteurs particulièrement sensibles aux conditions climatiques, comme l'agriculture ou la sylviculture (*cf.* chapitres *2.2.1. Production agricole*, *2.2.2. Production forestière*, *2.4.3. Puits de carbone*), les scénarios prennent en compte les effets du changement climatique sur les dynamiques de croissance des espèces végétales. Cependant, l'effet de crises ponctuelles (incendie, insectes et pathogènes, tempêtes, gels tardifs) n'est en général pas encore intégré dans les évaluations quantitatives. Concernant le résidentiel-tertiaire, les besoins de froid sont évalués au niveau des bâtiments individuels et des réseaux de froid (chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires* et *2.3.2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux*). De manière générale, les conséquences du changement climatique sur les infrastructures sont appréhendées (chapitres *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*, *2.3.5. Hydrogène*, etc.) mais restent difficiles à évaluer dans le cadre de cet exercice.

Dans ce chapitre, il s'agit de préciser le chapitre *1.2. Société, modes de vie, récits*, en décrivant des types de réponses au changement climatique structurellement différenciés. Plus précisément, les quatre scénarios prospectifs connaîtront les mêmes aléas climatiques, cependant ils pourront produire des réponses différentes du fait :

- d'une évolution différenciée des rapports à la nature et de la conception de la biodiversité. Nature et biodiversité peuvent être appréhendées pour les ressources qu'elles offrent et les services qu'elles rendent (scénario 3), pour leur valeur intrinsèque (scénario 2) ou encore comme un tout auquel l'humanité appartient (scénario 1). La volonté de contrôle et d'exploitation de la nature pourrait au contraire rester prédominante (scénario 4). Les modalités de prise en charge de la nature et de la biodiversité auront un impact différencié sur les habitants et les organisations, en raison des choix différents en termes d'urbanisation, d'occupation des sols, d'infrastructures, de modes de production et de consommation ;

- de rapports sociaux et d'organisations collectives différenciés (eux-mêmes issus de la perception du risque, de la sensibilisation des citoyens…), qui induisent des stratégies d'adaptation différentes.

SCÉNARIO TENDANCIEL

La thématique de l'adaptation au changement climatique continue de souffrir d'un manque de visibilité au regard de sa « moitié », l'atténuation. En 2019, un rapport sénatorial [4] alertait pourtant sur « l'urgence déclarée » en pointant le choc climatique inévitable, les risques naturels aggravés, les surmortalités significatives lors des vagues de chaleur et les effets sanitaires indirects (notamment liés à la qualité de l'air), les projections inquiétantes concernant les ressources en eau et la perturbation des activités économiques. La première stratégie nationale d'adaptation au changement climatique publiée en 2006 ainsi que les plans nationaux qui se sont succédé soulignent la prise en compte croissante de cet enjeu dans les politiques publiques mais n'ont pas suffi à garantir des actions efficaces d'anticipation des impacts du changement climatique. Le manque de moyens, à tous les échelons territoriaux (national, régional, infrarégional), tant financiers qu'humains (connaissance, ingénierie, etc.), a conduit à un déficit de pilotage de l'adaptation dans les politiques sectorielles pourtant impactées. La mobilisation insuffisante sur les enjeux d'adaptation, que ce soit à l'échelle des acteurs territoriaux ou des filières économiques, n'a pas permis le sursaut salutaire et suffisamment rapide qui aurait permis de préparer la société. Car même sans adaptation, l'acceptation d'une part accrue de risques est un choix qui se prépare, ne serait-ce qu'en termes de capacités de gestion de crise. En considérant que le changement climatique viendra « plus tard », les organisations sociales et économiques ne prennent pas la mesure des changements en cours et n'anticipent pas les investissements adaptés aux conditions environnementales des décennies suivantes ; les capacités de gestion de crise ne sont pas mises à niveau.

En 2050, la vision anthropocentrée d'une nature à disposition pour l'homme reste majoritaire. La nature n'est considérée qu'en fonction de son intérêt et n'est que partiellement protégée dans le seul but du renouvellement des ressources qu'elle fournit. Dans le meilleur des cas, des actions ponctuelles de compensation sont menées en réparation de dommages subis. Mais la prise en compte globale des enjeux écosystémiques ainsi que la conscience des équilibres naturels et des rythmes de renouvellement des milieux sont limitées, ce qui conduit à un appauvrissement irréversible de la biodiversité et des ressources naturelles. La France, qui figurait déjà en 2018 parmi les dix pays hébergeant le plus grand nombre d'espèces menacées au monde, perd peu à peu ses habitats naturels sous les pressions de l'artificialisation et de l'agriculture conventionnelle,

des pollutions diverses et de la surexploitation des ressources naturelles, aggravées par les effets directs et indirects du changement climatique.

La capacité de l'adaptation à devenir un intégrateur des grands enjeux du XXIe siècle (climat, santé, biodiversité, équité sociale) et un accélérateur des politiques d'atténuation est une opportunité qui n'a pas été saisie à temps, en dépit du lien direct et visible entre investissements consentis pour s'adapter et retour sur investissement. Penser les politiques publiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre de façon transversale (et non plus sectorielle) et en questionner les options prises au regard des impacts du changement climatique reste nécessaire.

Tableau 3 Synthèse des réponses possibles au changement climatique par scénario

	S1	S2	S3	S4
Gouvernance	• Locale	• Équilibrée régionale/ nationale	• Nationale au service de l'innovation	• Nationale pour protéger
Rapport à la nature	• Holistique	• Valeur intrinsèque	• Services rendus	• Au service de l'humanité
	• À préserver, protéger	• À restaurer	• À optimiser	• À recréer, réparer
Comportement de consommation	• Sobriété motrice	• Sobriété comme pilier avec efficacité et autres leviers	• Consommation optimisée en fonction des capacités de prélèvements sur la nature	• Rythme inchangé
Urbanisme	• Villes rétrécissantes[3]	• Villes écosystèmes	• Métropoles optimisées	• Métropoles refuges
Gestion des risques	• Acceptabilité forte • Risque fort	• Acceptabilité acquise • Risque géré	• Acceptabilité optimisée • Risque régulé	• Acceptabilité faible • Risque fort

3 Traduction littérale du terme *shrinking city*. Cela pourrait se traduire également par « villes en déclin » mais ce terme porte une connotation négative qui n'est pas complètement en phase avec la signification en anglais.

3. La gouvernance et le rôle de la technologie au cœur des scénarios

Le chapitre *1.2. Société, modes de vie, récits* aborde les transformations de la société *via* une fresque globale impliquant les besoins et modèles de régulation, l'évolution de l'environnement matériel et notamment la question des infrastructures qui distribuent les ressources et cristallisent des formes d'organisation, les représentations sociales et culturelles et les imaginaires collectifs. Ces éléments ayant trait au contexte collectif de réussite des scénarios sont complétés dans ce chapitre afin de brosser des tableaux de sociétés adaptées au changement climatique en 2050, étant entendu que chaque scénario comporte de nouvelles formes de collectifs, de nouvelles valeurs, de nouvelles organisations tournant autour de notre question centrale du rapport à la nature. Ce chapitre illustre les résultantes de processus d'adaptation, au-delà de l'adaptation des techniques et technologies, intégrée dans les chapitres sectoriels.

3.1. Scénario 1 : gouvernance locale et volet comportemental

Dans ce scénario, la stratégie d'adaptation au changement climatique s'appuie en particulier sur :

- une gouvernance locale centrée sur l'écologie scientifique, dont les préceptes dictent les politiques d'aménagement et d'occupation des sols ;
- un volet comportemental : la sobriété en termes de gestion des sols, de consommation de ressources, dont l'énergie.

En 2050, la prise de conscience de l'extrême fragilité et de la vulnérabilité de l'économie et de la société, ainsi que des dépendances liées à la mondialisation a déplacé les priorités et partiellement renversé la hiérarchie des valeurs, en mettant en avant les biens essentiels (la santé, l'alimentation), la solidarité et l'organisation collective. Inscrire la finitude des ressources comme fondement du fonctionnement économique et social a conduit à un partage des efforts d'autolimitation et de sobriété. Les évolutions conjuguées des productions et consommations tendent à favoriser la résilience face au changement climatique (*cf. Tableau 6* du chapitre *2.2.1. Production agricole*).

De nouvelles organisations du partage oscillent, selon les régions et les ressources disponibles, entre répartition des ressources, avec parfois pénuries (eau, énergie) et autolimitation volontaire des usages et activités. Une modération organisée a remplacé la surconsommation du début du siècle, assurant à chacun un accès minimum aux ressources essentielles. La dimension collective de la gestion de la sobriété est aussi ce qui fait son acceptabilité, grâce au caractère démocratique des efforts de résolution des problèmes : mise en réseau pour mobiliser ou solliciter des idées, cocréation participative des solutions, assemblées citoyennes… en bref l'intelligence collective est à l'œuvre et favorise une économie du lien social plus que du bien matériel, très ancrée sur les territoires et leurs ressources *(1.2. Société, modes de vie, récits)*.

Ainsi le référentiel d'organisation, notamment de l'économie, est devenu en priorité le local, en opposition au global. Puisque les citoyens ne se conçoivent plus séparés de « leur » environnement, ils structurent leurs activités à l'échelle de bassins de vie où les ressources permettent d'assurer sur place une grande partie de leur subsistance. Les politiques locales intégrées d'autonomie alimentaire sont une priorité de l'action publique. Les politiques d'aménagement et d'occupation des sols sont pilotées par la nécessité de réduire les distances (pour accéder au travail, aux services…), de limiter l'étalement urbain (*cf.* chapitre *1.2. Société, modes de vie, récits*) et l'emprise de l'humain sur la nature. La nature reprend ses droits en ville (parcs, jardins individuels ou collectifs, agriculture urbaine sociale et solidaire, réensauvagement de certains espaces). Outre cette préoccupation, la volonté de maintenir des continuités écologiques et la complexité des interactions entre le vivant et son environnement stimulent les dynamiques d'adaptation des écosystèmes ; elles minimisent en retour les impacts climatiques sur les ressources stratégiques climato-dépendantes (eau, production alimentaire, biomasse, etc.). En parallèle, la nature étant devenue un patrimoine à protéger, les réserves naturelles se sont multipliées.

La concentration urbaine est perçue comme nocive, entraînant en conséquence un coup de frein au mouvement de métropolisation du XXe siècle. Les grandes villes ont perdu du terrain au profit des campagnes ou des villes de petite taille, une réalité urbaine visible, soutenue par la pénurie de logements abordables et les canicules, qui ont fait se vider des quartiers entiers au début du XXIe siècle. Dans ces villes rétrécissantes, on cherche avant tout à refaire la ville sur la ville avec une attention particulière portée à la qualité de la densité urbaine, notamment pour

réduire les îlots de chaleur urbains : réinvestissement des friches mettant en pratique l'urbanisme circulaire ; l'eau (bassins, réservoirs, lacs artificiels et rivières) revient à la vue de tous après avoir été pendant des décennies masquée par une couverture de béton. Les espaces aquatiques ont la cote. Ils ont le double avantage d'apporter fraîcheur et agrément lors de grosses chaleurs et d'absorber les précipitations extrêmes, selon le principe des villes-éponges.

Dans certains quartiers, les habitants partagent des pièces de vie ou des équipements selon le principe du *co-housing*, mais aussi les espaces de travail, optimisant ainsi les mètres carrés ; les bâtiments et les espaces sont modulables et réversibles. La maîtrise des consommations d'eau s'illustre dans la généralisation des toilettes sèches (ou toilettes à litière biomaîtrisée), qui a modifié certaines techniques de construction.

Ce renversement des valeurs s'est construit sur la durée, sous l'impulsion des collectivités territoriales qui, notamment pour des raisons économiques et d'inclusion sociale, ont misé sur la sobriété et sur les solutions d'adaptation fondées sur la nature. Ainsi les habitants ont constaté que des zones humides préservées et restaurées jouaient un rôle de régulateur naturel. Puis les collectivités, assistées des pouvoirs publics et des assurances, ont organisé des replis stratégiques notamment face aux risques d'inondation et de submersion marine et laissé la nature réinvestir ces zones à risques.

Les capacités de résilience climatique reposent sur :

- **les capacités de résilience** propre des écosystèmes ;
- **l'acceptabilité des risques par les citoyens**, qui ont acquis une forte adaptabilité psychologique et comportementale, permettant de positionner la sobriété comme un volant de premier ordre pour absorber des aléas climatiques directs ou leurs impacts socio-économiques ;
- **une partie de l'appareil productif fondé sur les *low-techs* et l'artisanat :** les systèmes techniques et les technologies, simplifiés et rendus plus robustes, sont plus contrôlables et réparables par les citoyens.

3.2. Scénario 2 : génie écologique et équilibre entre échelons national et local

Dans ce scénario, la stratégie d'adaptation au changement climatique s'appuie sur :

- **une gouvernance équilibrée** entre le niveau national et régional ;
- **les techniques de génie écologique** : les services écosystémiques sont intégrés à tous les programmes de construction et de maintenance des infrastructures, les villes sont structurées par leurs trames écologiques.

La trajectoire historique « tout fossile » du XXe siècle avait modelé nos rapports sociaux et écologiques et orienté nos valeurs et nos conceptions du monde, de l'homme et de la nature. L'éthique environnementale qui s'est développée en réaction au XXIe siècle a permis d'attribuer une valeur intrinsèque[4] à la nature. La préservation de la nature se fait pour elle-même et pas seulement parce qu'elle est utile à l'humanité. Cette préoccupation s'exprime dans le droit français, avec l'introduction des concepts d'écocide et de droits de la nature[5]. Politiques et scientifiques se sont entendus sur les seuils acceptables et les dynamiques à mettre en œuvre pour dévier du scénario catastrophe et revenir en deçà des limites planétaires : l'action publique nationale détermine la juste mesure entre la limitation des activités humaines et la restauration de la nature. L'échelon national coordonne et mutualise les besoins d'investissements d'adaptation au changement climatique entre l'ensemble des bassins de vie régionaux et planifie des stocks de ressources stratégiques. L'échelon régional, voire infrarégional pour certains aspects très locaux (submersion, trait de côte…), suit en continu les pressions exercées sur les ressources naturelles pour ajuster les politiques publiques et sectorielles.

Les habitudes de coopération et de solidarité se sont développées, soutenues par la transformation des préférences sociales vers des réponses plus collectives aux questions de santé, de sécurité (notamment alimentaire) et de réduction des dépendances, y compris climatique. La nécessaire transformation des modes de vie vers plus de sobriété et de services à la personne a également fait l'objet d'un consensus général de la population. Les citoyens s'impliquent dans leur vie personnelle et associative, l'État organise des temps de service civil et environnemental. Au-delà de la protection de la nature, la vie des citoyens est régie par la nécessité de « réparer » les dégradations environnementales intervenues jusqu'au début du XXIe siècle. La prise en charge de la biodiversité est ainsi devenue un élément moteur de l'organisation de la société. Cette orientation permet notamment à l'agriculture et au système alimentaire d'intégrer intrinsèquement les évolutions du changement climatique pour s'y adapter (*cf.* chapitre ***2.2.1. Production agricole***).

Même si les citoyens ont fait le choix de la sobriété, y compris numérique, la technologie est présente pour s'informer, communiquer, mesurer et suivre la biodiversité, avec comme objectif constant le partage de ces données. Ces technologies sont mises au service de la prévention des risques naturels (en particulier les feux de forêt, qui demandent la plus grande réactivité), de solutions d'adaptation fondées sur la nature et de l'ingénierie écologique ; celles permettant de régénérer les espaces naturels abîmés sont très développées (transcription des messages chimiques que s'échangent les végétaux, régénération d'espèces, dépollution…). Les écosystèmes apportent des capacités d'adaptation diversifiées, mais subissent aussi de nombreux risques liés au climat (dépérissement des espèces non adaptées au manque d'eau, évolution des phénologies, feux de forêt, assèchement des cours d'eau…). Partout, les services écosystémiques sont valorisés.

Dans ce contexte, l'importance de la donnée au service de la lutte contre les impacts du changement climatique a été bien comprise. La coopération s'exprime par des open data (données publiquement disponibles, facilement accessibles, utilisables et redistribuables sans frais) ou des collectifs de données [5]. De nouvelles formes de collaboration numérique, sobres en énergie, sont développées, associant différentes parties prenantes, notamment issues de la société civile et du secteur privé[6]. L'initiative *Big Data for Social Good*, qui consiste à utiliser les données de réseau anonymisées des opérateurs mobiles pour lutter contre les événements climatiques extrêmes, s'est généralisée et permet désormais de transmettre en temps réel les zones les plus touchées, le nombre de personnes à secourir, leur emplacement ou leur déplacement.

La donnée ne constitue pas en elle-même une technologie, mais un intrant pour une meilleure prise de décision. Elle permet par exemple la gestion collective de l'eau, pour en gérer la raréfaction. Les régies de distribution d'eau, les villes, les agences de l'eau, les agriculteurs, les industriels et les producteurs d'électricité (hydraulique et nucléaire) et d'hydrogène mettent en commun leurs données afin de planifier la répartition de la ressource entre les différents usages.

Les réseaux Sentinelles ont renforcé leur mission de prévention des impacts sanitaires du changement climatique. La gestion environnementale est collaborative : des données géographiques participatives sont recueillies pour suivre la dégradation de l'environnement sur le territoire et mises à disposition *via* un portail national alimenté par toutes les parties prenantes (citoyens, entreprises, associations…). De même pour certaines activités prélevant des ressources naturelles, comme la pêche ou la forêt à l'instar de **Global Fishing Watch** et **Global Forest Watch** par exemple.

4 La valeur intrinsèque correspond à l'attribution d'une valeur morale à une chose en tant que fin en soi, par opposition à la valeur instrumentale pour laquelle sa valeur morale dépend de son utilité.
5 Octroi de la personnalité juridique à des entités vivantes ou des écosystèmes (droits de la nature en Équateur, rivière Magpie au Canada, fleuve Whanganui en Nouvelle-Zélande, fleuve Rio Atrato en Amazonie [partie colombienne], fleuves et rivières du Bangladesh).
6 À l'image du *Building Communities Resilient to Climatic Extremes* (associant la FAO et Telefónica) qui utilise les données d'appel pour mesurer les déplacements de personnes lors d'événements extrêmes.

L'innovation technologique, notamment pour la collecte des données, se veut néanmoins frugale [6], tant dans sa conception que dans ses modalités de fonctionnement. C'est le cas, par exemple, de ces réglettes [7] à prix abordable dotées de capteurs communicants par liaison radio qui visent à optimiser le rendement agricole tout en diminuant l'usage d'eau, d'énergie et d'engrais.

La ville devient écosystème. L'imperméabilisation ainsi que l'artificialisation des sols sont réduites au maximum afin de diminuer les conséquences des précipitations intenses. La ville se densifie en hauteur et de manière maîtrisée : optimisation des usages des espaces publics et privés, reconversion des friches, utilisation des dents creuses[7], renouvellement urbain, lutte contre la vacance. Les tours sont désormais autosuffisantes en énergie, accueillent de véritables écosystèmes végétaux, abritent logements, bureaux, hôtels, crèches… La biodiversité, en s'intégrant très en amont des projets, devient une infrastructure urbaine en tant que telle en renforçant des corridors écologiques… Des fermes verticales [8] apparaissent, les jardins communautaires et les potagers urbains se multiplient. Objectif : reverdir la ville, permettant de réduire les effets d'îlots de chaleur urbains et de faciliter la gestion des eaux pluviales, mais aussi produire de manière intensive – et responsable – au plus près des lieux de consommation.

La résilience climatique et les mesures de prévention, de régulation ou de transformation des habitats sont caractérisées par deux marqueurs forts :

- **le choix du collectif** dans les processus d'adaptation ;
- **l'inclusion de la nature dans le droit**, qui ne régit plus seulement les relations entre les individus, mais aussi entre eux et la nature. Les actions d'adaptation au changement climatique sont ainsi plus facilement acceptées. Cette mise en œuvre découle de plusieurs décennies d'éducation à la nature et de service civil dédié aux écosystèmes.

3.3. Scénario 3 : la technologie au service de ressources à développer

Dans ce scénario, la stratégie d'adaptation au changement climatique s'appuie sur :

- **une gouvernance nationale** intégrant les dynamiques sectorielles et territoriales, avec l'objectif non seulement de contrôler les risques climatiques, mais surtout de soutenir des opportunités de développement économique ;
- **les innovations technologiques** : les technologies sont un moyen de connaissance, de suivi et de régulation des impacts du changement climatique. Elles apportent également de nouvelles flexibilités et capacités d'adaptation.

En 2050, la nature est vue comme un ensemble de ressources à développer, utiliser et optimiser pour le bénéfice des humains. L'effort ne porte pas tant sur la réduction des impacts négatifs de l'activité humaine que sur la création d'impacts positifs. Après des décennies de surexploitation, des actions de développement du biotope sont ainsi guidées par un calcul de résultats aussi contrôlables que possible. Cette nouvelle vision du monde se déploie grâce à l'économie symbiotique, c'est-à-dire la possibilité de développer une relation de croissance mutuelle entre des écosystèmes naturels prospères et une activité humaine intense dans tous les domaines de l'économie. Cette vision d'une cohabitation apaisée de l'espèce humaine avec la nature s'est construite grâce à des coopérations d'un genre nouveau entre industriels, centres de recherche, fonds d'investissement et politiques. Cette transformation s'est opérée sur une trentaine d'années, grâce à un effort gigantesque nécessitant d'énormes investissements publics et privés. Les objets à intelligence incorporée se sont multipliés ; ils viennent suppléer l'action des opérateurs humains lorsque ceux-ci ne peuvent pas être

7 Espace non construit entouré de parcelles bâties.

physiquement présents, par exemple *via* l'automatisation de processus chronophages ou à risques. Ainsi dans le domaine de l'agriculture des drones autonomes dotés de systèmes robotiques et utilisant des logiciels de contrôle permettent non seulement aux engins de se mouvoir dans l'espace, mais aussi de prendre des décisions permettant, par exemple, un suivi des besoins en eau et nutriments à la parcelle. Ils sont complétés par de puissantes technologies de mesures en temps réel et de modélisation. Celles-ci sont mises au service d'une gestion des stocks de ressources naturelles à l'optimum, entre prélèvements et régénération. Les capacités privées en matière de surveillance du climat et de cartographie des risques sont renforcées, en particulier pour les secteurs agricole et forestier. Elles permettent de juguler l'impact des extrêmes climatiques.

Ressource en constante diminution, l'eau est au cœur de ces nouvelles innovations : pour la production (générateurs autonomes d'eau atmosphérique, captage de l'eau dans les processus industriels, amélioration des techniques de dessalement), la dépollution et le recyclage (purification, désinfection, filtration…). La mer n'échappe pas à cette vision utilitariste. De nouvelles techniques d'élevage en eau profonde permettent de ne pas entraver les activités de surface, comme les quartiers littoraux flottants qui répondent au double défi de la pression foncière, persistante depuis le XXe siècle, et du recul du trait de côte. Cependant, et contrairement aux prévisions de l'INSEE des années 2020, un (ré)aménagement territorial s'effectue : les agglomérations de montagne, offrant davantage d'espace et des conditions climatiques plus favorables durant la saison sèche d'été, se développent ; les agglomérations littorales les plus exposées se dédensifient, en particulier sur le pourtour méditerranéen. Dans ce contexte, les enjeux économiques liés à la préservation du tourisme sont très importants.

La ville aussi s'optimise et s'agrandit. La domotique avancée, associant relevés des capteurs, algorithmes prédictifs et intelligence artificielle, régule le comportement des bâtiments (consommation d'eau et d'énergie, réactions aux extrêmes climatiques, etc.) et des flux de la ville (maîtrise de la qualité de l'air, brumisateurs géants, gestion automatisée des réseaux de froid, des déchets…) face aux aléas climatiques. Avec ce nouveau rapport à la nature, le sous-sol a perdu de sa dimension anxiogène et permet d'étendre la ville par le dessous. Les grandes métropoles ayant conservé une dynamique de croissance importante, le sous-sol est désormais considéré comme un environnement riche et donc utilisable, qui vient compléter la surface. Face aux fortes chaleurs, les villes s'enterrent pour relier les quartiers de surface entre eux grâce à des infrastructures de transport multimodales bordées de commerces. Cette densification fonctionnelle par le sous-sol permet également d'améliorer la qualité de vie urbaine sans accroître le sentiment de promiscuité dans la ville.

Les acteurs économiques jouent la carte de l'accélération des processus d'adaptation, grâce à la compilation de données, la multiplication d'aménagements et de processus expérimentaux. L'esprit de rebond et d'innovation s'est imposé, déplaçant les seuils d'acceptabilité des risques vers un niveau admissible d'exposition plus élevé : un équilibre à l'optimum entre risques naturels et risques technologiques est trouvé.

3.4 Scénario 4 : une stratégie nationale guidée par des politiques de sécurité

Dans ce scénario, la stratégie d'adaptation au changement climatique s'appuie en particulier sur :

- une gouvernance nationale inscrite dans une globalisation poussée : elle pilote les politiques de sécurité y compris alimentaire et de santé, ainsi que les grands investissements pour garantir l'approvisionnement en ressources stratégiques, notamment en énergie et en eau ;
- des stocks stratégiques supplémentaires répartis sur le territoire : ils sont constitués pour faire face aux variabilités accrues et aux tensions sur les approvisionnements.

Dans S3, la domotique avancée, associant relevés des capteurs, algorithmes prédictifs et intelligence artificielle, régule le comportement des bâtiments.

En 2050, nos rapports à la nature restent anthropocentrés. Les services écosystémiques sont durablement affectés par la dégradation des environnements et la surexploitation des ressources naturelles, toutes deux aggravées par les effets directs et indirects du changement climatique. Dans ce contexte, la maîtrise technique de la nature par les hommes devient un objectif de résilience et c'est *via* des solutions ciblées et technocentrées que les défis écologiques sont affrontés. Petit à petit, la technologie supplée aux services écosystémiques dégradés, donnant naissance à une nature augmentée ou réparée, que ce soit pour :

- **les services de soutien** liés aux cycles de l'eau (écoulement, rétention, érosion…), du carbone (séquestration), à la formation des sols (structure, composition), etc. ;
- **les services d'approvisionnement** (agriculture, sylviculture, pêche, etc.) ;
- **les services de régulation** des impacts du changement climatique (inondations, agents pathogènes, etc.), mais aussi la pollinisation…

Les objets techniques produits sont caractérisés par leur autonomie, s'autorégulant et fonctionnant comme de véritables organismes, à l'instar des abeilles-robots développées pour la pollinisation des cultures. À défaut de sauvegarder la nature, on la recrée. Au croisement de la biologie, des mathématiques et de l'informatique, la biologie de synthèse [9] s'impose dans bien des domaines tels que l'alimentation, la santé (production de nouveaux médicaments, notamment face aux nouveaux éléments pathogènes, thérapies personnalisées, etc.), la dépollution (détection et dégradation de composés toxiques dans l'eau ou les sols), l'énergie (carburants), les matériaux (soie, plastiques, composites…).

Les grandes villes et l'artificialisation des sols se développent sous l'impulsion de la recherche d'un « toujours plus » de confort et de sécurité. En dépit de sa fragilité systémique, l'environnement urbain véhicule une image sécurisée qui répond à une certaine aversion aux risques de la société. L'intelligence artificielle, qui connecte les bâtiments et les différents quartiers entre eux, permet des autodiagnostics, des réactions en temps réel au service de la résilience de la ville, de ses infrastructures et de ses équipements. Selon la localisation des villes (et donc des impacts qu'elles subissent), des espaces de protection (contre la chaleur, les inondations) ont été créés.

En dépit de systèmes de surveillance du climat très développés[8], de modélisations poussées pour obtenir les niveaux de probabilités des risques les plus élevés, d'arrêts instantanés de certains systèmes sensibles et d'une communication immédiate vers la population et les entreprises, l'incertitude des événements climatiques a contribué à la création d'un gigantesque marché : celui de la protection individuelle contre les conséquences du changement climatique. Elle est rendue possible par le déploiement d'équipements individuels dans la plupart des secteurs : climatisation, purificateur d'air, constructions sur micropieux dans les bâtiments et les infrastructures de transport, matériels de protection contre les intempéries (gel, grêle, sécheresses…) dans l'agriculture, etc. Autant de dispositifs technologiques susceptibles de générer des impacts sur les besoins énergétiques et les ressources minérales.

Face aux aléas climatiques et dans l'objectif de préserver les modes de vie, la gestion des crises est renforcée et privilégiée par rapport à des solutions d'adaptation transformatives.

- **Avant la crise : stocks stratégiques et aménagements.**
  Des aménagements préventifs ont pour but d'établir des espaces tampons protégeant les populations :
  - renforcement des programmes de protection littorale sur l'ensemble des façades maritimes pour les risques de submersion maritime et le recul du trait de côte ;
  - terrassements, digues et barrages pour limiter les inondations et les mouvements de terrains en découlant (éboulements, glissements de terrain…) ;
  - maillage territorial de canaux et de retenues d'eau contre les sécheresses, dispositifs de recharge artificielle des nappes phréatiques avec réutilisation des eaux traitées ;
  - installation de plusieurs unités de désalinisation, visant à éviter autant que possible les restrictions d'eau, notamment dans les grandes métropoles conservant une densité d'habitation importante. La consommation énergétique de la désalinisation, à base de technologies solaires à concentration ou d'osmose inverse, reste marginale. Le marché régulé de l'eau fonctionne sur la même base que les marchés de l'électricité.

La multiplication d'événements extrêmes marque le grand retour des stocks publics, notamment dans les domaines de la santé, de l'énergie et de l'agriculture.

- **Pendant la crise : prévention, consignes de vigilance et d'alerte et protection civile.**
  Les moyens régionaux dédiés aux organismes de protection civile sont énormes. La qualité de la gestion de crise est obtenue au prix de nombreux exercices d'alerte. Pour les principaux aléas qui touchent la France (vagues de chaleur, inondations, tem-

8 Préfigurés par l'actuel GRAF (système de prévision atmosphérique mondial à haute résolution).

pêtes…), les actions d'information et éducatives (dès le plus jeune âge) sont massivement déployées. La connaissance approfondie des mécanismes climatiques, associée à l'existence d'un réseau de surveillance intelligent, rend possibles des prises de décision très rapides de la part des autorités politiques locales, parfois déléguées à une intelligence artificielle. Ces dernières sont en effet à même de juger le moment où il apparaît opportun de changer de niveau d'alerte. Ainsi, certaines procédures n'associent pas systématiquement ou préalablement le diagnostic scientifique humain à des actions de sécurité civile. Chaque région dispose cependant, en cas de besoin, des conseils d'un climatologue renommé et reconnu par la population. Le succès des procédures d'alerte est au moins autant, si ce n'est plus, imputable à l'instauration d'un système de confiance cristallisé autour de cette personnalité scientifique, impliquée au quotidien dans l'information sur les risques climatiques et les moyens de s'en protéger. Une attention particulière est accordée par les municipalités à la population touristique, particulièrement vulnérable. Il s'agit à la fois de l'informer sur les risques en cas de phénomène climatique anormal et de la prendre en charge, dès lors qu'une évacuation est rendue nécessaire. En cas d'événement particulièrement grave et lorsque les moyens locaux et régionaux sont insuffisants pour faire face à la situation, des moyens supplémentaires sont disponibles à l'échelle nationale.

- **Après la crise : reconstruction, retours d'expérience et indemnisations.**
  L'intelligence artificielle permet d'analyser rapidement et précisément les événements, d'évaluer les dommages causés aux bâtiments, aux infrastructures et aux équipements urbains, d'optimiser la mobilisation des ressources, de calculer les besoins et les possibilités de réaménagement et d'anticiper un « retour à la normale » des activités. L'exploitation intelligente des retours d'expériences de crises passées améliore les réponses apportées au fil du temps. Elle a notamment permis de modifier en profondeur les pratiques de l'assurance et des modalités d'indemnisation, en diminuant par exemple le seuil à partir duquel on considère qu'un risque est assurable. L'assurance sur mesure est désormais possible grâce à des contrats hyperpersonnalisés. Le fait que plus de risques soient assurés contribue au sentiment collectif d'une société plus sûre.

L'accroissement des risques naturels accentue donc la volonté de contrôle de la nature et sa déconnexion de l'économie et de la société : si les aléas climatiques ne sont pas contrôlables, il faut pouvoir en circonscrire au maximum les effets sur les populations, en multipliant les services d'information et les technologies de protection des citoyens et des activités économiques. Cette intervention renforcée des pouvoirs publics a un coût, notamment pour compenser les services écosystémiques perdus. Elle demande aussi une réorganisation des finances publiques et des systèmes d'assurance. Le changement climatique fait donc peser un double risque, celui des impacts climatiques eux-mêmes, et un risque sur notre modèle social : les choix opérés dispensent certes d'une modification en profondeur de nos modes de vie, mais tendent à accentuer les inégalités sociales et territoriales dans un contexte où le manque d'équité de notre modèle agite la société depuis le début du XXIe siècle.

4. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] https://www.carbonbrief.org/explication-le-rechauffement-climatique-sarretera-t-il-des-que-les-emissions-nettes-seront-nulles.

[2] https://www.pnas.org/content/116/47/23487.

[3] **IPCC**, *Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Summary for Policymakers*, B5.3, 2021, p. 28.

[4] **Sénat**, *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : urgence déclarée*. Délégation à la prospective – Rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, 2019.

[5] https://datacollaboratives.org/explorer.html, https://aiforimpacttoolkit.gsma.com/.

[6] http://naviradjou.com/.

[7] https://www.industrie-techno.com/article/salon-de-l-agriculture-gstake-une-reglette-connectee-smart-cost.42780.

[8] https://www.freethink.com/videos/vertical-farming.

[9] http://www.biologie-de-synthese.fr/.

https://leonard.vinci.com/.

https://vincent.callebaut.org/object/150105_parissmartcity2050/parissmartcity2050/projects.

https://droitsdelanature.com/.

OFB, AgroParis Tech, *Les Ressources de la prospective au service de la biodiversité. Comment mobiliser les futurs pour les politiques publiques de la biodiversité ?*, Résumé pour l'action, 2021.

Société française de prospective, *Le Monde après la Covid : traces, scénarios, questions*, 2021.

Thierry Gaudin (dir.), *2100. Récit du prochain siècle*, Éditions Payot, 1990.

Laura Rodriguez, *Savoir agir avec la nature : entre écologie scientifique, valeurs collectives et conceptions du monde*, Environnement et société, université de Montpellier, 2018.

AFD, « Usages émergents des technologies au services du développement : un nouveau paradigme des intelligences », *Policy Paper*, n° 6, mars 2021.

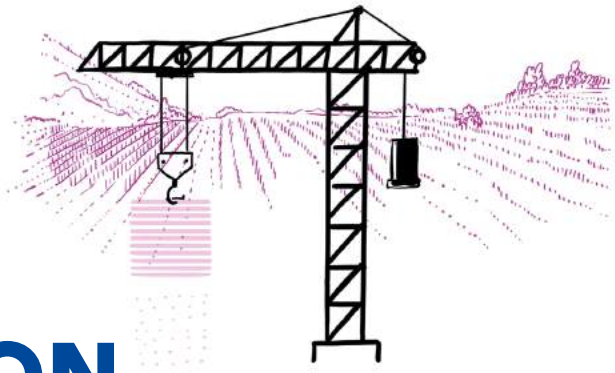
Bruno Villalba, « Sobriété : ce que les pauvres ont à nous dire », *Revue Projet*, n° 350, 2016 (https://www.cairn.info/revue-projet-2016-1-page-39.html).

2

RÉCIT DES SCÉNARIOS PAR SECTEUR

01

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION



79 Aménagement territorial et planification urbaine

92 Bâtiments résidentiels et tertiaires

172 Mobilité des voyageurs et transport de marchandises

231 Alimentation

1. Aménagement territorial et planification urbaine

1. Une nécessaire mobilisation de toutes les parties prenantes
80

2. Rétrospective des tendances
82

3. Les scénarios
86

4. Vers une meilleure imbrication des échelles spatiales et temporelles
90

5. Références bibliographiques
91

1. Une nécessaire mobilisation de toutes les parties prenantes

La prospective à l'horizon 2050 appliquée à l'aménagement territorial et à la planification urbaine fait écho aux objectifs du deuxième Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC 2) et plus spécifiquement à la Stratégie d'action de l'ADEME sur l'adaptation au changement climatique, ainsi que celle sur l'urbanisme durable. Ce chapitre fait également référence à la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) qui donne un cap de neutralité carbone à l'horizon 2050.

Il est également en phase avec la loi « climat et résilience » d'août 2021 [1]. Celle-ci introduit l'objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) à l'horizon 2050, une division par deux de la consommation des sols d'ici à 2031 et l'inscrit dans les documents de planification comme les SRADDET[1] et les SCoT[2]. Il répond également aux quatre grands piliers de la démarche « Habiter la France de demain » lancée par le ministère de la Transition écologique en 2021 qui vise à des territoires sobres, résilients, inclusifs et productifs.

La mobilisation de toutes les parties prenantes, dans une approche systémique et coordonnée, représente un enjeu clé pour accompagner la transition écologique, économique et sociale ainsi que l'adaptation au changement climatique de nos territoires [2].

Les territoires et notamment les villes sont, d'une part, au cœur de la consommation des ressources naturelles de nos sociétés et, d'autre part, directement impactés par les conséquences déjà observées du changement climatique, mais également par celles des crises sanitaires, économiques et sociales.

Pour rendre les territoires plus durables, il est indispensable de développer des modèles d'économie circulaire urbaine et territoriale durable, ce qui implique une gestion durable, efficace et surtout une utilisation réduite de nos ressources naturelles limitées. Les nouvelles économies des territoires devront évoluer vers une transformation à long terme et durable de la société vers la sobriété. Les territoires ont subi une restructuration socio-économique importante à la suite de la désindustrialisation, de la numérisation et du développement technologique en cours. À mesure que l'interconnexion de nos territoires s'accroît, les modes de production et de consommation se transforment, impactant toutes les échelles territoriales, du local au régional.

Tout comme l'atténuation, l'adaptation au changement climatique est explicitement devenue une des missions des politiques climatiques territoriales. Par exemple, un des enjeux essentiels de l'adaptation des villes face à l'élévation des températures globales consiste à réduire la dégradation du climat urbain estival, notamment en limitant l'intensification des îlots de chaleur urbains.

Systématiquement, ce chapitre abordera les quatre scénarios par plusieurs entrées.

- **La construction de la ville sur elle-même**, *via* la requalification, l'intensification des usages, les reconstructions et/ou reconquêtes possibles.

En effet, « le renouvellement urbain est un processus de mutation, initié ou accompagné par les institutions publiques, qui permet de "refaire" de la ville à partir d'un tissu de ville existant, par opposition à l'extension urbaine qui absorbe des espaces jusqu'alors non urbanisés pour en faire de nouveaux morceaux de ville, principalement au détriment des surfaces agricoles et/ou naturelles avoisinantes » [3].

Arrêter l'étalement urbain et l'artificialisation des sols est un prérequis plus particulièrement pour l'objectif ZAN. Pour atteindre cet objectif, il sera nécessaire de désartificialiser et renaturer ou refonctionnaliser les sols par des surfaces équivalentes à celles consommées par l'urbanisation.

- **Les solutions d'atténuation et/ou d'adaptation au changement climatique**, en insistant sur le renforcement des solutions d'adaptation fondées sur la nature (SAfN).

Cette démarche prospective repose sur la nécessité de cohérence des politiques publiques environnementales participant à la lutte contre le réchauffement climatique et à la transition écologique. À cet égard, l'intégration des objectifs de conservation, de restauration et d'utilisation durable de la biodi-

1 Schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires.
2 Schéma de cohérence territoriale.

versité dans les politiques publiques, rappelée par le GIEC et l'IPBES dans leur dernier rapport, est un axe fort de l'action de l'État, mentionné au sein des principes généraux du code de l'environnement (*cf.* article L. 110-3).

- **L'aménagement territorial et la planification urbaine**[3].

L'aménagement du territoire désigne aujourd'hui l'action publique qui s'efforce d'orienter la répartition des populations, leurs activités et leurs équipements dans un espace donné et en tenant compte de choix politiques globaux. L'aménagement est l'une des formes de l'appropriation d'un territoire.

La planification urbaine est le contrôle de l'urbanisation par le pouvoir politique, urbanisation étant entendue ici au sens de la croissance des villes et de tout territoire urbanisé.

Les récits proposés pour la prospective concernant l'aménagement territorial et la planification urbaine ont pour objectif de les interroger dans un contexte de changement climatique, en considérant que :

- **une évolution des documents de planification territoriale** (ex. : SCoT, PLUi[4], etc.), en vue d'une planification dynamique, permettrait de mieux intégrer les enjeux d'atténuation et d'adaptation au changement climatique ;

- **l'expérimentation et l'évolution des solutions d'adaptation et d'atténuation au changement climatique** (outils, méthodes, modes d'organisation, démarches, etc.) au sein de territoires expérimentaux aux échelles locales (ex. : îlot, quartier, projet urbain, etc.) par des opérations d'aménagement opérationnel est indispensable pour atteindre les objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050.

3 http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire.
4 Plan local d'urbanisme intercommunal.

2. Rétrospective des tendances

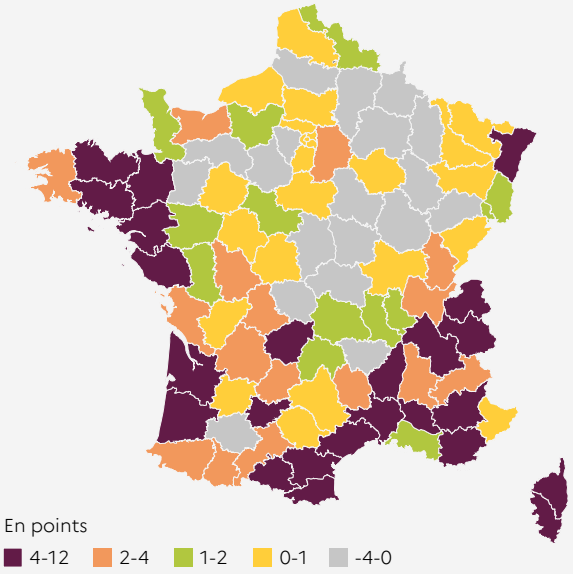
2.1. Tendances passées de l'urbanisation : des disparités spatiales avérées qui s'intensifient

En 2010, l'INSEE montre que la superficie de l'espace urbain en Métropole a progressé de 19 % en dix ans *(Figure 1)* à partir des unités urbaines. Les **unités urbaines** permettent de caractériser les communes de France selon **le double critère de la continuité du bâti et du nombre d'habitants**. Les villes occupent ainsi 22 % du territoire et presque 80 % de la population y réside. L'urbanisation progresse surtout le long des littoraux (sur les façades atlantique et méditerranéenne), mais aussi dans les Alpes *(Figure 1)*. De plus, une hausse du nombre et de la taille des petites agglomérations est observée *(Graphique 1)*. La carte montre également une progression de l'urbanisation essentiellement à l'Ouest et dans le Sud-Est faisant place à des disparités spatiales de plus en plus accentuées.

En 2020, une nouvelle délimitation des unités urbaines a été réalisée. **Une augmentation de 2,8 millions d'habitants sur les 2 467 unités urbaines de 2020** est principalement due à la croissance démographique des communes appartenant à une unité urbaine en 2010 et 2020. L'intégration de nouvelles communes explique également cet accroissement de population considérable.

Le rapport du Commissariat général à l'Égalité des territoires[5] de 2015 [4] montre qu'au 1er janvier 2016, la France comptait 66,6 millions d'habitants et que près 40 % de la population française est concentrée sur les trois régions suivantes : Île-de-France, Auvergne-Rhône-Alpes et Hauts-de-France. **Les disparités spatiales en termes d'urbanisation s'intensifient et les grandes métropoles ont de plus en plus d'emprises territoriales**. Cette tendance ne semble pas changer à l'horizon 2040 si l'évolution du nombre d'habitants est prise en considération *(Figure 2)*. À l'horizon 2040, la population continuerait de croître fortement en Île-de-France, le long des façades atlantique et méditerranéenne et autour des agglomérations toulousaine et lyonnaise, favorisant un clivage de plus en plus marqué en matière d'urbanisation et d'extension urbaine.

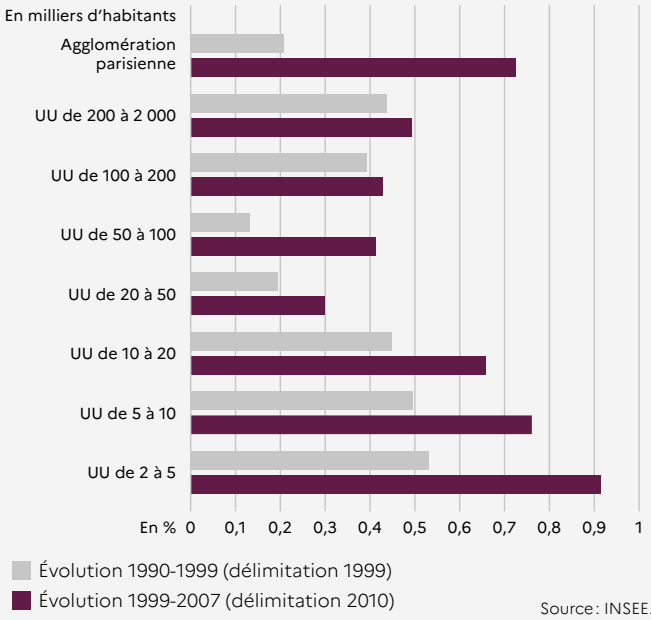
Figure 1 Évolution du taux d'urbanisation entre 1999 et 2007*



* Le taux d'urbanisation est le rapport de la population des communes urbaines à la population totale.

Source : INSEE.

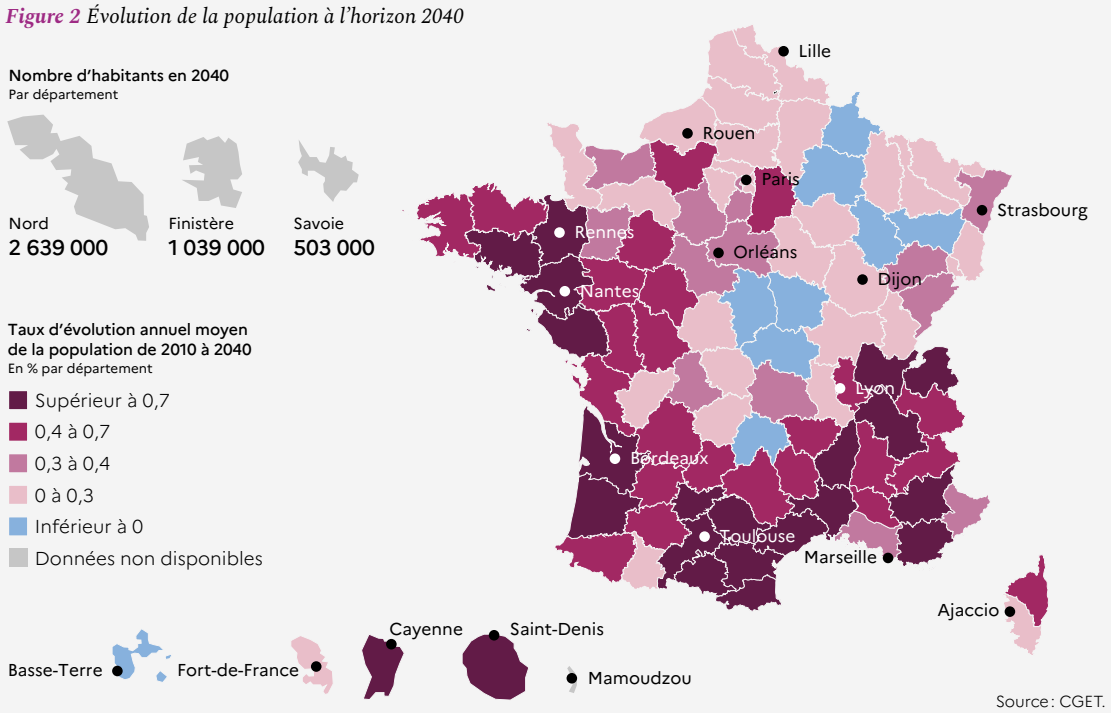
Graphique 1 Les petites unités urbaines sont les plus dynamiques – évolution annuelle moyenne de la population



Source : INSEE.

5 Intégré depuis 2020 dans l'Agence nationale de la cohésion des territoires.

Figure 2 *Évolution de la population à l'horizon 2040*



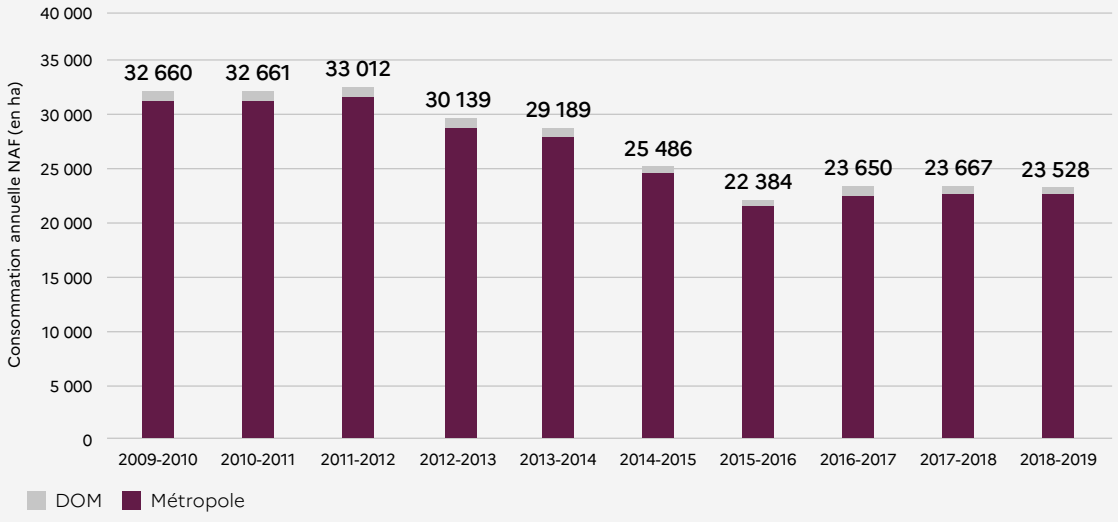
Source : CGET.

2.2. Les tendances passées de l'artificialisation de 2010 à aujourd'hui

À l'échelle nationale, l'objectif de ZAN, inscrit pour la première fois dans le Plan biodiversité de juillet 2018 [5], prend de plus en plus d'importance dans les débats actuels et les politiques publiques [6]. Il figure dans la loi portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets [1], issue des travaux des 150 citoyens de la Convention Citoyenne pour le Climat. Concernant l'évolution de l'artificialisation des sols en France, le *Graphique 2*, tiré du portail de l'artificialisation des sols[6], donne la tendance de 2009 à 2019.

De 2009 à 2019, une tendance à la baisse de l'artificialisation est observée avec notamment une stagnation du rythme de l'artificialisation sur les dernières années depuis 2016-2017. L'année 2018 montre même une très légère diminution (- 139 ha au niveau national, - 85 ha sur la Métropole).

Graphique 2 *Évolution de l'artificialisation entre 2009 et 2019 (France métropolitaine)*



Source : Fichiers fonciers/Observatoire national de l'artificialisation.

6 https://artificialisation.biodiversitetousvivants.fr/parution-des-donnees-dartificialisation-2009-2019.

Aujourd'hui, 3,5 millions d'hectares sont artificialisés en France, soit 6,4 % du territoire. Ramenée à la population, la France est 15 % plus artificialisée que l'Allemagne et 57 % plus artificialisée que le Royaume-Uni ou l'Espagne.

- Entre 20 000 et 30 000 ha de surfaces naturelles sont consommés chaque année. L'artificialisation augmente presque quatre fois plus vite que la population (+ 70 % depuis 1981 contre + 19 % sur la même période pour la population).

- L'habitat contribue à près de 50 % du rythme d'artificialisation, les infrastructures 16 %, les commerces et services marchands 5 %.

2.3. Les échelles spatiales et temporelles de la prospective en urbanisme et aménagement

2.3.1. Des *storylines* prenant en compte l'urbanisation galopante et les changements d'occupation des sols

Afin de prendre en considération la population croissante en ville, depuis le rapport AR5 du GIEC, les approches en *storylines* ou récits ont été utilisées pour mieux éclairer l'évaluation des risques et la prise de décision, pour aider à comprendre les processus régionaux et pour représenter et faire apparaître plus clairement les incertitudes des projections climatiques. L'objectif est de contribuer à la construction d'une vue d'ensemble des voies potentielles du changement climatique qui va au-delà de la présentation de données et de chiffres [7] [8] [9] [10]. Ainsi, les *socio-economic pathways* du GIEC, du SSP1 au SSP5 décrivent une gamme de tendances plausibles dans l'évolution de la société au XXIe siècle. Ils ont été développés afin de connecter un large éventail de communautés de recherche et se composent de deux éléments principaux : un ensemble de scénarios décrivant les futurs sociétaux et un ensemble de mesures quantifiées du développement à des échelles agrégées et/ou résolues spatialement. Chaque SSP est un cheminement cohérent, plausible et une description intégrée d'un avenir socio-économique. Mais ces futurs ne rendent pas compte des effets du changement climatique et aucune nouvelle politique climatique n'est supposée. L'AR 6 développe davantage ces SSP avec l'intégration des changements d'occupation des sols plus précis [11] [12].

2.3.2. Zoom sur la France : entre géoprospective et prospective

Une étude [13] annonce que « la plupart des estimations de l'intensité de l'étalement urbain sont effectuées à partir des recensements de population, ou encore des bases de données sur les constructions de logements. La mesure précise des superficies occupées par les bâtiments ou "imperméabilisées" par diverses formes de revêtements, macadam ou béton, est une affaire délicate qui conduit à des estimations assez variables ».

À l'échelle nationale, les exercices de prospective tels que « Territoires 2040, aménager le changement » ou les travaux scientifiques de géoprospective au sein de la communauté des géographes permettent d'évaluer les tendances d'artificialisation des sols passées et futures selon différents scénarios prospectifs. **Pour quantifier l'étalement urbain en précisant les surfaces occupées par les bâtiments ou imperméabilisées, il est nécessaire d'intégrer les échelles spatiales et temporelles ainsi que les représentations cartographiques qui permettent d'analyser les changements.**

95 %
de la population vit désormais sous influence urbaine.

La prospective « Territoires 2040, aménager le changement[7] », lancée fin 2009 par la Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale (DATAR), est un travail conséquent qui a donné lieu à des cartes qui réinventent notre manière de voir et de comprendre les territoires français. « Ces cartes sont autant de propositions en forme de questionnements prospectifs qui permettent d'envisager différents futurs de nos territoires. Ce travail avait pour ambition de stimuler l'esprit critique, de poser des questions clés et de susciter un véritable débat public pour permettre aux acteurs de construire, ensemble, les territoires de demain[8]. »

En France, le recensement de l'INSEE (2018) montre que 95 % de la population vit désormais sous influence urbaine. Parallèlement à la croissance des villes, se dessinent, autour et entre elles, de vastes espaces dits périurbains, dont les habitants ont non seulement adopté des modes de vie citadins mais sont également liés à la ville par leur emploi et leurs pratiques quotidiennes. L'urbanisation des campagnes suscite d'autres interrogations : l'étalement urbain et ses conséquences en matière d'artificialisation des sols et de consommation de terres agricoles ; la mutation culturelle, sociale et économique de l'espace rural ; la transformation des sites.

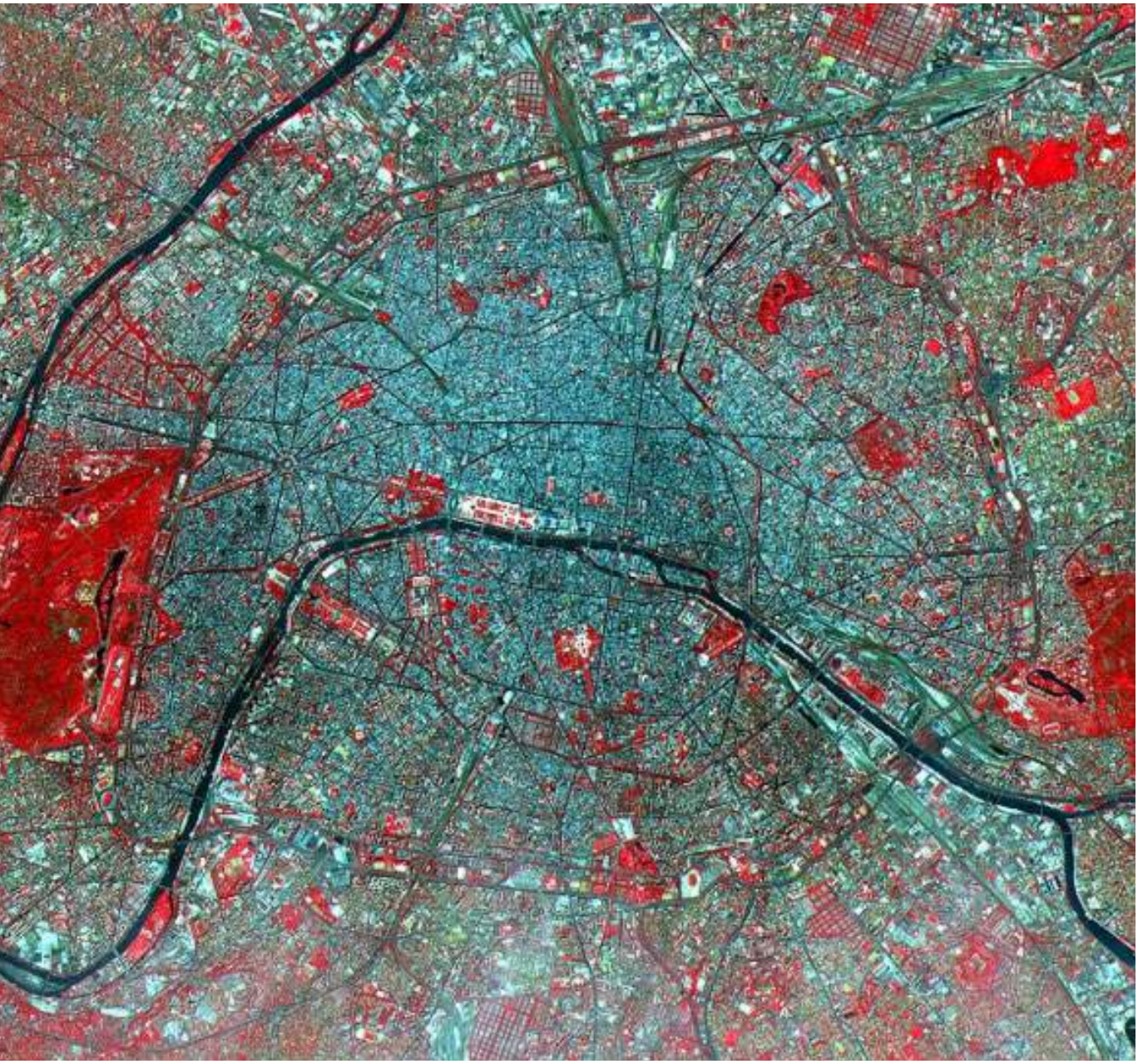
7 Pour plus de détails, consulter http://ife.ens-lyon.fr/geo-et-prospective/lexposition-la-france-de-2040/.
8 http://ife.ens-lyon.fr/.

Au sein de Territoires 2040, il s'agissait de mettre en place des scénarios exploratoires : « Chaque scénario – c'était une consigne pour les construire – devait dessiner un "ordre futur de contradictions", c'est-à-dire un ensemble cohérent de processus, interdépendants autant par leurs convergences que par leurs conflits. Ni scénario noir, ni scénario rose : uniquement des scénarios multicolores et cependant contrastés les uns par rapport aux autres. D'où l'impossibilité d'une décantation finale vers quelques scénarios simplificateurs » [14]. Concernant la métropolisation et l'urbanisation, les scénarios possibles en 2040 reposaient sur l'hyperpolisation, la régiopolisation, la postpolisation ou la dépolisation.

Concernant les villes intermédiaires qui sont essentielles dans le paysage urbain français, les scénarios possibles en 2040 étaient axés sur les communautés, les laboratoires verts, les spécialités ou les satellites.

L'image de laboratoires verts met l'accent sur le fait que les villes intermédiaires ont tiré leur épingle du jeu en imaginant à leur échelle des solutions intégrées, peu émettrices en gaz à effet de serre et économes en énergie. Cette image est présente au sein des *storylines* des scénarios de la présente prospective.

À l'échelle locale, les travaux sur la géoprospective permettent de spatialiser les futurs possibles de l'artificialisation des sols en prenant en considération les spécificités territoriales. Différents types de modèles comme les automates cellulaires ou les modèles multi-agents permettent d'élaborer des scénarios prospectifs [15].



3. Les scénarios

3.2. Scénario 1 : vers un urbanisme plus sobre et circulaire

Dans un contexte de rééquilibrage territorial et de changement climatique, ce scénario prône un urbanisme durable [16] tendant vers plus de circularité et de sobriété, recherchant la réversibilité du bâti et des espaces pour adapter rapidement les territoires aux enjeux de la transition en s'appuyant sur les ressources locales.

On cherche avant tout à **refaire la ville sur la ville**, avec une attention particulière à **la qualité de la densité urbaine**. Les « vides » urbains sont gérés de façon qualitative, selon les territoires et les besoins, en tenant compte notamment de la **place de la nature en ville** : réensauvagement de certains espaces, production alimentaire lorsque cela est pertinent, etc.

Cet **urbanisme durable** (sobre, résilient et inclusif) recherche la sobriété des projets d'aménagement en requestionnant les besoins de construction au regard des usages, ce qui conduit à des choix alternatifs à la construction ou la rénovation de logements, locaux tertiaires, zones commerciales, équipements publics. Par exemple, la mutualisation, le renoncement, la chronotopie[9] des lieux, le changement d'usage d'un lieu existant, la lutte et l'anticipation de la vacance, la reconversion des friches, la densification horizontale et verticale sont des éléments pris en compte.

Au sein de ce scénario, **la sobriété dans l'aménagement urbain** consiste à renouveler, entretenir et faire évoluer en fonction des besoins les aménagements et infrastructures existants, ce qui évite la consommation de ressources et l'étalement, ainsi que la dégradation et le déclin des centres-villes, petits bourgs, zones d'activité et de commerce. Cette vision est projective. Elle inscrit la sobriété des aménagements dans une vision globale du projet de territoire liant la qualité des espaces publics et le bien-être, plutôt que se conformant à l'idée courante de la densité qui favoriserait la dégradation de la qualité de vie, voire la santé des citoyens. Une attention particulière est apportée à la qualité de la densité urbaine (travail sur les formes urbaines et les espaces publics, etc.).

La qualité des sols est systématiquement prise en compte dans la planification territoriale et les documents d'urbanisme.

L'urbanisme circulaire est de mise au sein de ce scénario, considéré comme un ensemble de pratiques et préceptes qui visent à réduire l'étalement urbain et à lutter contre l'artificialisation des sols. Cet urbanisme recherche également la réversibilité et la modularité (intensification des usages) du bâti et des espaces qui permettent d'adapter rapidement les territoires aux enjeux de la transition en s'appuyant sur les ressources locales, la mutualisation et la coopération.

Ce scénario envisage également une fin de la croissance urbaine avec une ruralisation très forte, correspondant à l'accélération du signal faible actuel d'une volonté d'habitants urbains diplômés de revenir « à la campagne » pour y exercer une activité concrète dont l'utilité est palpable.

Sur les espaces publics, on observe un aménagement modulable et une réflexion sur les temps de la ville (chronotopie) vers une intensification de leurs usages. Ces derniers sont plus inclusifs, réversibles et accompagnent les changements de comportements vers des mobilités actives (marche, vélo, etc.) intégrant les enjeux environnementaux, sociaux, économiques, sanitaires et sociétaux. Les centres-villes se libèrent de la place prépondérante de la voiture.

Une attention accrue est donnée à la présence de la **nature en ville**, par exemple l'accessibilité des parcs et jardins, la production alimentaire (développement de l'agriculture urbaine sociale et solidaire, jardinage individuel et collectif), le réensauvagement de certains espaces où la nature reprend ses droits.

Concernant **la planification urbaine**, l'utilisation de coefficients de végétalisation et de biotope se généralise. L'adaptation au changement climatique et l'atténuation se démocratisent au sein des PLUi et la planification est désormais adaptative : elle s'adapte aux rythmes du changement climatique, aborde une

9 Prise en compte simultanée des dimensions temporelles et spatiales d'un lieu. On peut parler de jour/nuit, travail/loisir, été/hiver, rapidité d'accès/lenteur. L'exemple le plus probant est la place du village qui s'adapte pour accueillir le marché hebdomadaire, le stationnement, le banquet/la fête du village, les vœux du maire, la déambulation et les temps de jeu et de pause pour certains usagers, etc. : www.ville-amenagement-durable.org/Chronotopie-temps-et-lieu-au-service-de-l-amenagement.

transformation résiliente en fonction des besoins et des spécificités des territoires.

Dans ce scénario, les efforts réalisés sur la séquence « Éviter, réduire, compenser » portent davantage sur « éviter » et « réduire » que sur « compenser ».

3.3. Scénario 2 : place à la participation citoyenne

Ce scénario est similaire à S1, mais il s'en différencie dans la mesure où la participation citoyenne et la coopération entre acteurs prennent une place centrale.

Au sein de ce scénario, on observe un imaginaire de l'agilité et de la coopération, qui permet d'adapter les territoires aux enjeux de la transition grâce à la coopération entre acteurs d'un même territoire et de différents territoires (rural/urbain, etc.).

Les réseaux sentinelles sont démocratisés afin de veiller sur les usagers de la ville en périodes de canicule. Ces dernières sont désormais totalement gérées par le comportement des usagers et les caractéristiques urbanistiques des bâtiments, avec un engagement à zéro émission de carbone. Un parcours « habitat » permet de reloger les familles sur des logements vacants et des espaces de partage, de convivialité et de bienveillance sont intégrés : îlot de fraîcheur, garderie, aide aux courses pour les personnes âgées, etc.

Des actions de concertation, de partage, de participation citoyenne sont menées sur les éléments suivants :

- santé et confort : nuisances et pollutions, solutions de rafraîchissement et accessibilité, verdissement par les usagers de leurs espaces, des rues, des balcons, des terrasses lorsque cela est possible en fonction du contexte climatique local sont travaillés. Les espaces privés contribuent ainsi aux trames vertes et aux corridors écologiques en ville ;
- usages et comportements : mutualisation, espaces partagés, zones refuges en cas de crise. Des lieux communs sont des espaces de fraîcheur et d'inclusion ;
- pédagogie et information.

La résilience des usagers est placée au cœur de ce scénario tout comme la résilience des territoires[10] : il s'agit de faire face et de « se » transformer face aux chocs inhérents au XXIe siècle : les aléas météorologiques et climatiques extrêmes intensifiés, les crises sanitaires (comme celle de la Covid-19) ou les chocs en cours et à venir, qu'ils soient matériels ou immatériels.

Concernant la séquence **« Éviter, réduire, compenser »**, ce scénario met en collaboration les acteurs des différents territoires (interurbains, intra-urbains, ruraux-urbains) afin de décliner et de cibler la compensation en essayant de contrebalancer ses propres émissions de CO_2 par le financement de projets de réduction d'autres émissions ou de séquestration de carbone.

3.4. Scénario 3 : la *smart-city* au cœur d'un nouvel esprit haussmannien

Dans un contexte de poursuite de la métropolisation et de changement climatique, ce scénario se base sur un imaginaire de la modernité et de l'optimisation technique.

Il s'agit de rechercher un idéal de ville parfaite permettant de répondre aux besoins grâce aux innovations techniques. La philosophie s'inscrit dans un « nouvel esprit haussmannien » : les bâtiments obsolètes sont détruits grâce à des technologies qui permettent de déconstruire et réutiliser les matériaux. Des quartiers optimisés notamment grâce à une optimisation morpho-énergétique, permettant de répondre aux nouveaux enjeux de changement climatique, sont construits. L'approche est centrée sur le modèle de *smart-city*, la donnée étant au cœur du processus d'une société interconnectée par les services du numérique.

La nature en ville trouve sa place notamment au travers des nouvelles constructions. Elle est présente de manière contrôlée dans les projets d'aménagement opérationnel : toitures et façades végétalisées lorsque les conditions climatiques le permettent. D'autres solutions de rafraîchissement urbain sont envisagées, mettant en exergue les innovations techniques et technologiques de pointe : chaussée rafraîchissante, toits rafraîchissants, etc. La connexion de plusieurs solutions de rafraîchissement pour obtenir des résultats est modélisée afin d'obtenir le potentiel de rafraîchissement maximal. On combine des solutions d'adaptation fondées sur la nature avec des solutions orientées sur la typomorphologie urbaine ou sur les propriétés thermiques et réfléchissantes des matériaux, etc. Le coût de ces déploiements est mis en relation avec les documents de planification comme le SCoT et le PLUi portant sur des échelles spatiales et temporelles imbriquées afin d'obtenir une mise en cohérence avec les évolutions climatiques. En effet, ces innovations permettent d'estimer les solutions les plus adaptées et les plus durables dans un contexte de changement climatique, avec un type de climat plus chaud, éventuellement des

10 https://wiki.resilience-territoire.ademe.fr/wiki/Qu%27est_ce_que_la_r%C3%A9silience_des_territoires.

événements climatiques plus fréquents comme les canicules, etc. La nature au sein de ce scénario apporte des services écosystémiques et doit être en symbiose avec les éléments urbains et les activités humaines.

La croissance de la ville se fait à la fois par étalement horizontal et croissance verticale associée à un nouvel esprit haussmannien. En effet, les espaces souterrains de parkings sont reconvertis, de nouveaux espaces publics sont créés avec une logistique maîtrisée.

Cela conduit à des politiques de déconstruction/reconstruction d'ampleur dans des zones où les bâtiments sont jugés obsolètes (bâti de mauvaise qualité thermique, par exemple) et à une urbanisation en extension (par exemple le long des axes de transport), notamment *via* un habitat peu économe en foncier.

La reconversion des friches, la réhabilitation des bâtiments vacants et la densification du tissu pavillonnaire hors métropoles progressent lentement. Les « vides » sont considérés comme une opportunité de densifier le tissu urbain. On met en œuvre d'importantes opérations d'aménagement qui englobent plusieurs parcelles.

3.5. Scénario 4 : la technologie au service d'une ville idéale

Ce scénario est similaire à S3 car il repose sur un imaginaire de la modernité, de l'optimisation technique et la recherche d'un modèle de ville idéale permettant de répondre aux besoins grâce aux innovations techniques. Ces innovations techniques permettent de modéliser la ville, ses formes, son fonctionnement, d'en appréhender et d'en maîtriser les meilleures caractéristiques possibles. La technologie aide en effet à trouver de nouveaux espaces constructibles : densification sur la mer, sous-sols (notamment pour les activités économiques de type agriculture), grandes hauteurs, etc. Les paramètres bioclimatiques (vent, humidité, hygrométrie, températures, etc.) sont relevés et suivis pour d'éventuelles modularités des espaces et pour favoriser l'information des populations en cas de nécessité grâce à des systèmes d'alertes précoces disponibles aux échelles intra-urbaines. En effet, la nature est représentée comme un danger qu'il faut contrôler et exploiter, ce qui diffère de S3 où il s'agit de mettre en place une économie symbiotique.

La nature au sein de ce scénario est technicisée et dominée grâce au biomimétisme : façades complètement végétalisées, arrosage pilotable, mesures constantes de paramètres météorologiques et climatiques pour optimiser les rendements de l'agriculture urbaine lorsqu'elle est déployée, développement de matériaux perméables et drainants.

L'agriculture urbaine se développe dans ses formes les plus technologiques (ex. : serres urbaines, conteneurs, aquaponie) en récupérant les flux urbains (chaleur de récupération).

3.6. L'artificialisation dans les scénarios

Les principaux paramètres de différentiation et de modélisation des scénarios en regard de l'artificialisation, pour le logement, les services publics, les activités industrielles, commerciales, tertiaires, logistiques et agricoles, les infrastructures de mobilité et de la production d'énergie sont listés dans le *Tableau 1*. Une appréciation qualitative de l'évolution relative de ces paramètres entre scénarios y est indiquée.

S'agissant de l'impact des constructions (logements, tertiaire, industrie, etc.), le travail se base sur l'outil développé par le CGDD [6] afin de modéliser des trajectoires possibles vers l'objectif de zéro artificialisation nette (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires* pour la présentation des principes).

Pour les infrastructures de mobilité, les principales sources d'artificialisation concernent les infrastructures routières et en particulier les constructions de nouvelles routes communales, qui sont à mettre en lien avec l'étalement urbain. Les autres infrastructures de transport ont, d'après les premières estimations, des impacts bien plus faibles sur l'artificialisation totale. Les niveaux d'artificialisation des infrastructures apparaissent comme croissants depuis S1 vers S4 (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*).

L'impact des modèles d'aménagement proposés sur l'usage des terres et la qualité des sols (artificialisation, capacité à stocker du carbone, à filtrer l'eau…) est central et sera abordé dans un feuilleton dédié à ce sujet.

Tableau 1 Paramètres de différenciation et de modélisation des scénarios au regard de l'artificialisation

Paramètres	TEND	S1	S2	S3	S4
Taux de logements vacants	++	- - -	- - -	-	++
Renouvellement urbain/zones d'activités économiques/réhabilitation et/ou transformation bâtiments	++	+++	+++	++	+
Densité bâtie	+	++	++	+++	+
Renaturation		+	++		
Nouvelles routes communales	+++	+	+	++	+++
Nouvelles autoroutes	++			+	+++
Nouvelles voies cyclables (hors agglo.)	+	++	+++	+	
Nouvelles voies ferrées	+	+	++	+++	++
Agrandissements d'aéroports	++			+	++

Point de vigilance : les « valeurs » pour chaque scénario sont données de manière relative et ne représentent en aucun cas une indication du poids du paramètre dans le résultat.
N.B. : les paramètres liés à l'évolution du mix énergétique seront présentés dans le feuilleton dédié à l'usage des terres et la qualité des sols qui paraîtra au premier trimestre 2022.

4. Vers une meilleure imbrication des échelles spatiales et temporelles

La séquence « Éviter, réduire, compenser » est appliquée à l'aménagement et à la planification des territoires mais ses exigences sont inscrites au code de l'environnement. Au-delà de cette exigence règlementaire, tenir compte dans chacun des scénarios de ce principe permettrait d'intégrer les contraintes liées aux limites planétaires notamment. L'une des plus prégnantes actuellement en France est celle de la disponibilité de surface en foncier. La compensation des atteintes à la biodiversité permettant d'atteindre l'objectif de « zéro perte nette de biodiversité » n'est en effet possible que dans les limites des territoires disponibles en France pour l'exercer.

Les paramètres (nature, niveau de précision et de quantification) utilisés dans cette prospective pour qualifier l'évolution de l'aménagement territorial et de la planification urbaine sont soit insuffisants, soit inadaptés pour permettre d'évaluer leurs incidences sur les différents cobénéfices. La biodiversité en est un exemple.

En effet, il serait judicieux de prendre davantage en considération l'imbrication des échelles spatiales et temporelles et de disposer d'une information spatialisée : une même activité peut engendrer des impacts complètement différents selon le type de territoire concerné, notamment au regard de sa sensibilité et de ses enjeux. Cette spatialisation est particulièrement importante à connaître concernant la nature en ville. La végétalisation ne pourra pas être le remède à toutes les configurations urbaines car elle reste tributaire des conditions climatiques locales qui évoluent vers des climats plus chauds à l'horizon 2050. Il faudrait également mesurer les variables du système mis en exergue : la ressource en eau est-elle conséquente ? L'effet rafraîchissant des solutions d'adaptation fondées sur la nature (SAfN) est-il probant ?

Cet exercice devrait également prendre en compte davantage la planification urbaine, peu étudiée dans les récits des scénarios ci-dessus, pour combiner à la fois les temporalités liées à la mise en place des documents de planification (ex. : environ 30 ans sur les SCoT) mais aussi celles du changement climatique.

Cette planification se voulant dynamique, voire « adaptative », elle pourrait être en effet davantage développée pour être mieux articulée avec l'aménagement opérationnel.

D'après C. Voiron (entretien avec l'ADEME en 2021), l'expression « planification adaptative » est un concept en émergence, dans une optique proche de celle de J. Ahern [17] qui traite de planification et de design adaptatifs. Il ne s'agit pas de gestion adaptative mais bien de planification et plus précisément de planification territoriale multi-échelles. L'objectif visé n'est pas uniquement l'adaptation au changement climatique, mais aux diverses formes de changements à venir, prévisibles et imprévisibles. Cette planification « adaptative » est prise dans le sens de réajustement de la stratégie territoriale et des actions programmées qui en découlent et non pas en ce qu'elle se distingue de l'atténuation. Ce réajustement s'impose du fait du caractère évolutif de l'adaptation. En effet, d'une part, le contexte global et local évolue continuellement et, d'autre part, les choix opérés antérieurement (décisions politiques, action engagée ou inaction) font évoluer la capacité d'adaptation du territoire dans un sens ou dans l'autre. La capacité d'adaptation à un instant T n'est donc pas garante de la capacité à l'instant T + 1. Elle est donc à reconsidérer continuellement au regard des évolutions conjointes du système territorial et de son environnement [18]. Ce réajustement qui s'impose dans l'optique de la recherche s'impose également dans celle de la planification. Cette notion de planification « adaptative » fait écho au concept de mutabilité développé en urbanisme.

L'objectif visé n'est pas uniquement l'adaptation au changement climatique, mais aux diverses formes de changements à venir, prévisibles et imprévisibles.

5. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **Loi n° 2021-1104** du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (*Journal officiel* du 24 août 2021).

[2] **ADEME**, *Stratégie Urbanisme Durable de l'ADEME. Inspirer, accompagner et animer les acteurs de l'urbanisme dans la transition écologique et énergétique pour des territoires désirables, partagés, équilibrés*, 2018, 16 pages.

[3] **ADEME**, *Réussir la planification et l'aménagement durables*, Les cahiers techniques de l'AEU, 5 : « Construire la ville sur elle-même », 2015, 140 pages.

[4] **CGET**, *Regards sur les territoires, rapport 2017*, 2018, 160 pages.

[5] **Ministère de la Transition écologique**, *Plan biodiversité* (https://www.ecologie.gouv.fr/nicolas-hulot-presente-plan-biodiversite-loccasion-du-premier-comite-interministeriel-biodiversite), 2018.

[6] **CGDD**, *Trajectoires vers l'objectif « zéro artificialisation nette »*, éléments de méthode (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Trajectoires%20vers%20l%E2%80%99objectif%20z%C3%A9ro%20artificialisation%20nette.pdf), 2019.

[7] **Kjersti Fløttum et Øyvind Gjerstad**, *Narratives in climate change discourse*, Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate 23 Change, 8(1), e429, doi:10.1002/wcc.429, 2017.

[8] **Mithra Moezzi *et al.***, *Using stories, narratives, and storytelling in energy and climate change 36 research*, Energy Research & Social Science, 31, 1-10, doi:10.1016/j.erss.2017.06.034, 2017.

[9] **Sampada Dessai *et al.***, *Building narratives to characterise uncertainty in regional climate change through expert 34 elicitation*, Environmental Research Letters, 13(7), 074005, doi:10.1088/1748-9326/aabcdd, 2018.

[10] **Theodore G. Shepherd *et al.***, *Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of 52 climate change*, Climatic Change, 151(3-4), 555-571, doi:10.1007/s10584-018-2317-9, 2018.

[11] **IPCC**, *Summary for Policymakers in* « Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change » [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)], Cambridge University Press, 2021.

[12] **George C. Hurtt *et al.***, *Harmonization of global land use change and management for the period 850-2100 (LUH2) for CMIP6*, Geosci. Model Dev., 13, 5425-5464 (https://doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020), 2020.

[13] **Marianne Guerois et Denise Pumain**, *Des tendances de l'urbanisation en France et en Europe*, 2017, p. 18, ffhal-02270043f (https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02270043/document).

[14] **Martin Vanier**, *28 scénarios de prospective territoriale pour la France : relecture transversale*, L'Information géographique, 2015/2 (vol. 79), p. 79-91, doi: 10.3917/lig.792.0079 (https://www.cairn.info/revue-l-information-geographique-2015-2-page-79.htm).

[15] **Rahim Aguejdad *et al.***, *Étalement urbain et géoprospective : apports et limites des modèles de spatialisation, Cybergeo*, European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 782, mis en ligne le 14 juin 2016 (http://journals.openedition.org/cybergeo/27668).

[16] **Sylvain Grisot**, *Manifeste pour un urbanisme circulaire*, éditions Apogée, 2021.

[17] **Jack F. Ahern**, *From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world*, Lanscape and Urban Planning, 100, 2011.

[18] **Emmanuel Garbolino et Christine Voiron-Canico**, *Ecosystem and Territorial Resilience: A Geoprospective Approach*, Elsevier, 2020.

2. Bâtiments résidentiels et tertiaires

1. La transition des bâtiments : une multiplicité de leviers à actionner
93

2. Un parc immobilier en progression constante
97

3. Le bâtiment reflète des situations économiques et sociales contrastées
102

4. Méthode et outils de quantification des scénarios
107

5. Les scénarios explorent des stratégies bien distinctes
111

6. Ne négliger aucun levier d'action
165

7. Limites et perspectives
167

8. Références bibliographiques
169

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur
170

1. La transition des bâtiments : une multiplicité de leviers à actionner

Les bâtiments sont un élément essentiel de notre cadre de vie car ils abritent des activités humaines fondamentales : se loger, produire, se soigner, se divertir… Si le cadre bâti évolue peu, avec une hausse de seulement 1,1 % par an en moyenne du parc de logements au cours de ces trente dernières années, les besoins qui lui sont adressés, eux, évoluent. De fait, l'histoire des bâtiments est celle d'une adaptation permanente et réciproque entre le cadre bâti et ses occupants.

Pour répondre aux évolutions passées, comme la croissance démographique et économique, ou la tertiarisation de la société, plusieurs leviers d'adaptation ont été utilisés :

- **l'amélioration du parc ancien** (lutte contre l'insalubrité et le logement indigne). L'Agence pour l'amélioration de l'habitat a par exemple été créée en 1971 pour améliorer les logements locatifs privés construits avant 1948 qui ne disposaient pas encore des trois éléments de confort de base à savoir WC, salle de bain et chauffage central ;

- **la construction neuve**. Depuis les années 1980, le nombre total de logements dont la construction est entamée chaque année est en moyenne de 360 000 [1]. La France est le pays européen qui construit le plus de logements par habitant [2] ;

- **l'augmentation des surfaces unitaires**. Depuis les années 1980, le nombre de mètres carrés tertiaires croît plus vite que la population [3] et la surface moyenne de résidence principale par personne est passée de 25 m² en 1973 à 40 m² en 2013 [4] ;

- **la spécialisation des surfaces**, en construisant des bâtiments destinés à abriter une fonction particulière. Par exemple, les premiers bureaux répondant à des caractéristiques fonctionnelles et techniques standardisées datent des années 1970.

Ces leviers d'adaptation du cadre bâti aux évolutions sociales du XXe siècle sont aujourd'hui confrontés à deux défis majeurs :

- **les limites planétaires**. Sur la dernière décennie, la construction de logements contribue à 70 % de l'artificialisation des sols [5]. Les bâtiments représentent en France 45 % des consommations finales d'énergie, soit 30 % pour les logements, 15 % pour le tertiaire et près de 22 % des émissions de GES nationales : 14,5 % pour les logements, 7,4 % pour le tertiaire [6]. À ces émissions directes, s'ajoutent les impacts liés à leur construction et leur démolition. Les produits de construction et équipements représentent de 65 à 85 % de la totalité des émissions de GES liées au cycle de vie d'un bâtiment neuf[1] [7] ;

- **les évolutions de l'environnement** (changement climatique, perte de biodiversité…). Leur impact sur la capacité des bâtiments à assurer leur fonction est encore peu anticipé.

1 Selon la méthode d'analyse de cycle de vie statique utilisée dans E+C-.

Par ailleurs, le futur ne peut pas se penser à société constante. Si certaines évolutions, comme le vieillissement de la population (doublement du nombre de personnes de plus de 75 ans en 2050) sont des tendances lourdes qu'on peut anticiper, d'autres sont plus incertaines. Quelle évolution des modes de vie ? Du travail ? De la consommation ? Quel impact du numérique ?

En résumé : comment réussir l'adaptation réciproque entre cadre bâti et évolutions sociales tout en réduisant l'empreinte environnementale de nos bâtiments ?

Pour répondre à ce défi, quatre leviers d'action sont activables : la **sobriété** (réduire le besoin en ressources, dont l'énergie), l'**efficacité** (augmenter le service rendu par la consommation d'une unité de ressources/d'énergie), l'**utilisation de matériaux ou d'énergies moins dommageables pour l'environnement**, et enfin, la **compensation des impacts résiduels**. Dans le domaine du bâtiment, ils se déclinent à deux échelles : celle du parc dans son ensemble et celle de chaque bâtiment.

À l'échelle du parc bâti, ils se traduisent de la manière suivante :

- **la sobriété consiste principalement à réduire la surface par personne**. Selon l'indice actuel de peuplement des logements, en 2013, 70 % des ménages (85 % pour les plus de 65 ans) occupent des logements disposant d'au moins une pièce de plus que la norme (ces chiffres n'incluent pas tous les étudiants) [8]. Si cet indice nécessite d'évoluer pour prendre en compte les transformations sociales (familles recomposées, télétravail…) [9], ce phénomène historique de desserrement reste encore un impensé des politiques de transition écologique, alors que le vieillissement de la population pourrait l'accentuer ;

- **l'efficacité consiste à répondre aux besoins de bâtiment *via* une optimisation de l'utilisation du parc existant plutôt que par la construction neuve**. Il s'agit de réduire la vacance des bâtiments, qu'elle soit de longue durée (réhabilitation des logements vacants dégradés…), éphémère (urbanisme transitoire…), voire récurrente (écoles et bureaux vides soir et week-end pouvant accueillir des activités, résidences secondaires pouvant être transformées en résidences principales…). S'y ajoutent des choix urbains et architecturaux permettant d'utiliser efficacement le foncier (renouvellement urbain, recyclage des friches, densification) et d'adapter le bâti, sur le long cours, à des changements d'usage (réversibilité des espaces…) pour éviter de détruire pour reconstruire.

À l'échelle de chaque bâtiment, les leviers s'illustrent différemment :

- **la sobriété signifie** :
  - **utiliser moins d'équipements**. Par exemple, réduire le nombre de petits équipements de cuisine des ménages, augmenter la durée de vie de l'électroménager et des produits électroniques (réparer, acheter de la seconde main…), les mutualiser, etc. ;
  - **mieux les dimensionner**. Par exemple, assurer un juste dimensionnement des ballons d'eau chaude sanitaire (ECS) ou des chaudières (puissance, volume…), mais aussi des réfrigérateurs et des machines à laver par rapport aux besoins, etc. ;
  - **moins les utiliser** : chauffer seulement certaines pièces, diminuer le nombre de cycles de lavage du linge, etc. ;

- **l'efficacité signifie augmenter le sercice rendu par la consommation d'une unité d'énergie ou de ressources**. Cela nécessite d'isoler l'enveloppe du bâti. Mais cela passe aussi généralement par le remplacement des équipements anciens par de nouveaux plus efficaces lors de rénovations (changement des équipements de chauffage…) ou lors de leur renouvellement (achat d'une nouvelle machine à laver plus efficace, installation d'une pompe à chaleur plutôt que d'un climatiseur mobile à très bas rendement…). Cela passe aussi par l'intégration d'équipements performants dans la conception des bâtiments neufs. Cependant, le renouvellement d'équipements n'a de sens sur le plan environnemental que si son bilan global en analyse de cycle de vie est positif. Pour certains équipements, allonger la durée de vie peut être une option préférable (voir notamment [10]) ;

- **la substitution par des matériaux ou des énergies peu impactants pour l'environnement**. Pour les matériaux, il s'agit d'adopter des modes constructifs faisant appel à des matériaux et des équipements moins impactants pour l'environnement, voire qui stockent du carbone, comme des biomatériaux. L'histoire du bâtiment est celle d'une complexification croissante des matières premières entrant dans sa conception. Elle s'est doublée d'un élargissement géographique des périmètres d'approvisionnement. Les stratégies actuelles dans le bâtiment se déclinent autour de trois leviers principaux : la substitution des minéraux de construction à forte émission de CO_2 par d'autres ressources domestiques à faibles émissions, la réparabilité des équipements et enfin, le réemploi, la réutilisation et le recyclage. L'usage de matériaux biosourcés durables peut par ailleurs contribuer au stockage du carbone séquestré en amont, la durée de ce stockage étant fonction de la durée de vie du ma-

tériau. Pour les énergies, il s'agit de remplacer les équipements alimentés à l'énergie fossile par de nouveaux fonctionnant à l'aide d'énergies renouvelables voire décarbonées et aussi, lorsque c'est pertinent, de produire une énergie renouvelable ;

- **la compensation des impacts résiduels** : ce levier pourrait être activé pour les émissions de GES des bâtiments neufs quand celles-ci ne peuvent pas être évitées par exemple par contribution financière au développement d'infrastructures industrielles de type captage et stockage de carbone (CCS).

Enfin, certains leviers sont actionnables à une échelle intermédiaire entre le parc dans son ensemble et le bâtiment : celle du **quartier**. À cette échelle, il est possible d'agir pour limiter la surface par personne (notamment lorsque le bâtiment rend service au quartier, *via* par exemple un parking à vélo commun qui évite d'en créer un dans chaque immeuble), d'optimiser l'usage des ressources foncières (renouvellement urbain, réhabilitation des friches, densification) ou de permettre le développement d'énergies moins impactantes (notamment *via* le développement de réseaux de froid et de chaud).

Par ailleurs, **l'activité du secteur bâtiment (construction, rénovation et démolition) implique des consommations d'énergie dans les secteurs de l'industrie ou pour les chantiers**, qui peuvent également faire l'objet d'actions de sobriété, d'efficacité, de recours à des énergies ou matériaux moins impactants ou de compensation.

Le *Tableau 1* présente l'ensemble des leviers d'action. Ils ne sont pas tous de même nature. En effet, **alors que la sobriété et l'efficacité sont des leviers internes au secteur du bâtiment, le recours aux énergies décarbonées et la compensation déplacent la responsabilité de l'action vers d'autres secteurs** (filière de stockage du CO_2, développement des énergies renouvelables…). Mettre l'accent sur un levier plutôt qu'un autre relève d'une décision politique quant à la répartition de l'effort de transition entre secteurs et le rôle que le bâtiment doit jouer dans cette transition.

Tableau 1 Leviers d'action de la transition écologique des bâtiments et de leur adaptation au changement climatique

Sobriété Réduire le besoin en énergie et ressources	**Efficacité** Augmenter le service rendu par la consommation d'une unité d'énergie ou de ressources	**Énergies ou matériaux moins impactants** Utiliser des énergies et matériaux peu impactants pour l'environnement	**Compensation** Compenser les impacts résiduels	**Adaptation au changement climatique** Anticiper et gérer l'impact des aléas climatiques
À l'échelle du parc (ou du quartier)				
• Limiter la surface par personne	• Optimiser l'usage du parc existant pour construire moins • Optimiser l'usage du foncier	• Développer les réseaux de froid et de chaleur urbains	• Capter et stocker le carbone pour compenser les émissions du secteur bâtiment	• Anticiper les impacts sur la répartition et la composition du parc immobilier • Aménager le quartier pour atténuer les aléas climatiques (vagues de chaleur…)
À l'échelle du bâtiment *Ensemble des usages assurant le confort thermique et le soutien à la vie quotidienne : chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, ventilation, cuisson, électroménager, produits bruns et gris*[2]…				
• Utiliser moins d'équipements, mieux les dimensionner	• Réemployer, réutiliser, recycler les matériaux et équipements	• Adopter des modes constructifs avec des matériaux et équipements moins impactants	• Compenser les émissions carbone des bâtiments neufs (si non évitables) • Stocker le carbone dans les matériaux	• Anticiper les aléas climatiques qui affecteront l'intégrité des constructions • Adapter le bâti et ses équipements à l'évolution des besoins énergétiques des occupants
	• Améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment • Améliorer le rendement des équipements*	• Changer le vecteur énergétique*		

* La notion de rénovation énergétique recouvre ces trois actions, à des degrés divers en fonction de la manière dont la rénovation performante est définie.

2 Écran, ordinateur, tablette, boîtier, lecteur, console, imprimante, compteur, capteur/objet connecté, smartphones et appareils mobiles, Internet des objets (intelligence artificielle, robots, objets connectés, assistants virtuels), autres (casques bluetooth, etc.).

Ces leviers concernent à la fois le bâti (neuf ou existant) et la manière de l'occuper (la vie quotidienne des occupants).

- Pour les **bâtiments neufs**, les leviers d'action existent à l'échelle de chaque bâtiment, **tous les gains énergétiques possibles sur l'enveloppe ou les systèmes** n'ayant pas encore été engrangés. Cependant, les améliorations obtenues grâce aux réglementations thermiques successives diminuent le potentiel de ce levier d'action et déplacent la focale sur **l'impact environnemental sur tout le cycle de vie** (au-delà de la consommation d'énergie pendant la phase d'exploitation).

- Le levier d'action clé pour les **bâtiments existants** est leur **rénovation énergétique**. Cette notion recouvre à la fois la sobriété (baisse du besoin thermique par isolation de l'enveloppe, consignes de températures ou évolutions des comportements), l'efficacité (amélioration du rendement des équipements) et l'adoption d'énergies renouvelables, voire décarbonées. À l'heure actuelle, le rythme de rénovation énergétique des bâtiments en France est insuffisant pour répondre aux engagements climatiques. L'enjeu est triple : massifier (augmenter le nombre de bâtiments rénovés), approfondir les rénovations (améliorer l'impact énergétique de chaque rénovation) et améliorer la qualité (rénover mieux afin que les économies d'énergie soient effectives). Le défi est de taille : la demande actuelle pour une rénovation d'ampleur est embryonnaire et reste cantonnée à certains segments de maîtres d'ouvrage professionnels (bailleurs sociaux dans le résidentiel, foncières dans le tertiaire). Par ailleurs, la filière du bâtiment souffre d'un déficit d'attractivité et n'est pas encore organisée pour répondre à une augmentation de la demande tout en assurant la qualité des rénovations.

- **La vie dans un logement ou l'occupation d'un local tertiaire** repose sur l'utilisation d'équipements consommateurs d'énergie (produits électroniques et électroménagers, éclairage, équipements de cuisson…). Le potentiel de réduction de consommation de ces équipements fait appel à des leviers d'action qui recoupent à la fois la sobriété et l'efficacité et dans une moindre mesure, l'adoption d'énergies moins impactantes (par exemple pour la cuisson). Le défi de la transition sur la prochaine décennie sera une **évolution des modes de vie et des pratiques sociales qui permet d'aller au-delà des gains permis par la seule amélioration de l'efficacité énergétique des équipements.**

À ces leviers d'action de transition s'ajoute **la nécessité d'adapter les bâtiments aux changements environnementaux** : changement climatique, évolution de la biodiversité, diminution de l'accès à certaines ressources. Le changement climatique aura des impacts très divers sur le bâtiment : à cette échelle, les besoins énergétiques des occupants évolueront et les aléas climatiques affecteront l'intégrité des constructions. À l'échelle des territoires, la gestion du rafraîchissement urbain et des eaux pluviales (lors d'événements météorologiques intenses et de canicules) sera déterminante pour réduire l'exposition climatique d'un bâtiment. Les chaînes d'approvisionnement, les conditions de travail en périodes estivales, la disponibilité de la main-d'œuvre et les budgets des ménages seront également affectés, ainsi que la répartition et la composition du parc immobilier (par exemple dans les zones littorales soumises au risque d'érosion côtière). La certitude des changements climatiques à venir demande la mise en place de **stratégies d'adaptation pour le bâtiment** (*cf.* chapitre ***1.3. Adaptation au changement climatique***).

> Il est nécessaire d'adapter les bâtiments aux changements environnementaux.

Ce chapitre inclut les secteurs résidentiel et tertiaire[3]. L'ensemble des résultats présentés ici ont fait l'objet de corrections post-modèles pour être intégrés au bilan énergétique global (*cf.* chapitre ***1.1. Ambitions, objectifs, méthodes***).

3 Les consommations des bâtiments agricoles et industriels sont intégrées, mais non explicitées, dans les secteurs « Agriculture » et « Industrie ».

2. Un parc immobilier en progression constante

2.1. Évolutions socio-économiques

2.1.1. Confort et évolution des usages ont profondément modifié les attentes vis-à-vis du logement

Les grands éléments de rétrospective dans le domaine du logement sont (éléments adaptés de [11]):

- le développement du confort comme norme sociale centrale. Succédant à l'hygiénisme du XIXe siècle, la norme de confort s'est développée à la croisée entre progrès techniques (chauffage central…) et politiques publiques (définition des éléments de confort minimaux). Elle se traduit notamment par l'augmentation de la surface par personne (la norme sociale d'une chambre par enfant s'étant par exemple imposée) [12]. Le confort s'étend aussi aux équipements. Le taux d'équipement des ménages a augmenté, d'abord en électroménager, puis en produits bruns et gris (électroniques). Aujourd'hui les représentations du confort du logement évoluent, pour devenir synonymes d'intimité, de protection et de bien-être (le « cocooning »). Les pièces supports du bien-être corporel, comme la cuisine ou la salle de bains, sont désormais fortement investies. Plus récemment sont apparus de nouveaux critères de confort : couverture par les réseaux haut débit, qualité sanitaire (qualité de l'air intérieur notamment), etc. **Le problème est que la norme de confort actuelle s'articule difficilement avec les enjeux de transition écologique**. Or, de la réussite de cette articulation dépendra celle de la transition dans les usages quotidiens des logements ;

- la tertiarisation du logement, c'est-à-dire la réalisation, à l'intérieur du logement, d'activités « tertiaires » (s'instruire, se divertir, réaliser des démarches administratives, télétravailler…) auparavant réalisées dans des locaux dédiés à cet effet. « Elle s'appuie sur l'essor du temps libre et plus récemment sur les outils numériques. De plus, le fractionnement des emplois du temps peut faire rechercher une optimisation des déplacements. Les contraintes financières poussent à moins sortir et à réaliser des loisirs moins coûteux, chez soi [11]. » Cette tendance pousse à une augmentation de l'intensité d'usage des logements, mais également à une augmentation des flux de données numériques, sans que son impact sur la baisse des surfaces tertiaires soit pour l'instant avérée. En outre, ce surcroît d'activités dans les logements nécessite une infrastructure grandissante dans le secteur numérique pour gérer, stocker et traiter tous les contenus numériques du quotidien ;

- la complexification des parcours résidentiels du fait, notamment, des ruptures de vie (nouveau travail, naissances, divorce, chômage…). « L'augmentation de la période de la jeunesse et du temps d'études tend à repousser l'âge du départ du foyer familial de la part des jeunes (phénomène « Tanguy »), et à créer des situations d'allers et retours, entre logement à soi et logement des parents (« enfants boomerang »). Et explique en partie que les parents maintiennent une chambre pour les jeunes, de longues années après leur départ » [11]. Pour autant, la mobilité résidentielle n'a pas augmenté, sous l'effet de l'augmentation de l'accès à la propriété, du vieillissement de la population et de conditions économiques moins favorables. Cela n'aide pas à trouver une meilleure adéquation entre surface de logement et taille du ménage ;

- le regain d'intérêt pour les espaces mutualisés. L'expérience la plus connue et la plus pratiquée est la colocation, dont un Français sur quatre déclare avoir fait l'expérience, mais qui reste associée aux années de jeunesse et à une expérience de court terme [13]. La mutualisation d'espaces (buanderies, terrasses, chambres d'amis…) a reçu une attention renouvelée ces dernières années de la part des promoteurs privés ainsi que les expériences d'habitat participatif (qui bénéficient d'un regain d'intérêt, notamment avec l'appui des collectivités territoriales). Il est encore trop tôt pour savoir s'il s'agit d'une tendance amenée à se développer, ni même si ces espaces permettent une baisse de la surface par personne ou s'ils viennent ajouter de nouvelles surfaces aux espaces privatifs ;

- le logement occupe une place de plus en plus importante dans les dépenses contraintes des ménages. La part des dépenses pré-engagées pour le logement dans le revenu disponible brut des ménages est en effet passée de 13,8 % en 1975 à 23,2 % en 2013, pour redescendre légèrement par la suite (22,5 % en 2019) [14]. Cette hausse est due à une augmentation continue des prix des logements, bien supérieure au rythme de l'inflation et à celui du revenu disponible brut des ménages depuis les années 2000.

2.1.2. L'évolution des modes de vie a eu un très fort impact sur le parc tertiaire

La grande diversité du secteur tertiaire requiert une analyse rétrospective par branche *(Tableau 2)*.

Tableau 2 Immobilier tertiaire, rétrospective des tendances par branche

Branche	Analyse rétrospective
Bureaux (221 millions m² de surface chauffée en 2015)	Fort **développement des emplois de bureau** depuis le milieu du XXe siècle (tertiarisation de l'économie). La construction de bâtiments à usage spécifique date de la fin de la Seconde Guerre mondiale. Depuis les années 1970, les bureaux sont un **produit immobilier standardisé**. Le marché est soumis à des cycles de surproduction, puis d'augmentation de la vacance, au gré des cycles économiques et de dynamiques propres. **Malgré cela, la surface augmente de façon importante et régulière**. Le parc est aujourd'hui **concentré dans les métropoles régionales**. La tendance est à **l'augmentation du niveau de services** (accueil centralisé, gestion des accès et de la sécurité, restauration, auditorium, salles de sport, conciergerie, crèche d'entreprise…). **Les espaces de travail sont en constante évolution**. *Open space* à partir de la fin des années 1990, espaces paysagers dans les années 2010. Malgré ces évolutions, le ratio de surface moyenne en Île-de-France reste stable sur longue période, les surfaces ayant changé d'affection (bureaux individuels vers des espaces collectifs). Parmi les évolutions récentes, on peut citer le **nomadisme** (télétravail, co-working…) rendu possible par le numérique. En 2017, la France comptait 10 fois plus d'espaces de co-working que 10 ans auparavant. Ces évolutions participent d'une **augmentation du rythme d'obsolescence des bureaux.**
Cafés-hôtels-restaurants (64 millions m² de surface chauffée en 2015)	Le secteur a bénéficié de **l'augmentation du temps libre** et du **tourisme**, notamment international (83 millions de touristes en France en 2016 contre 30 en 1980). Parmi les tendances récentes : **développement du numérique**, notamment des plateformes de réservation ou de location, **multiplication des courts séjours** (*city-breaks*) « instagramables » par les plus jeunes, **spécialisation de l'offre** et développement d'hébergements insolites, **montée en gamme** générale des hébergements, ouverture d'hôtels urbains sur leur quartier (café, co-working…). Le parc hôtelier fait face à des **enjeux importants de mise aux normes** (incendie, accessibilité). Le développement de la restauration est porté par la **féminisation de l'emploi, l'accélération des modes de vie, le nomadisme alimentaire…** Sur ces 20 dernières années, **la restauration hors domicile et la restauration rapide ont crû,** ainsi que les groupes et les chaînes. Sur ces 10 dernières années, certaines tendances émergent : la restauration hors domicile se fait moins au restaurant. On assiste à la **montée en puissance des petites surfaces de proximité, de la vente en ligne et de nouveaux circuits hors foyer** (offres snacking des boulangeries, espaces snacking de la grande distribution, livraison…). Aujourd'hui, l'attente du consommateur se partage entre restauration « utilitaire » (rapide) et « festive » avec une **recherche croissante de qualité, d'authenticité.**
Commerces (211 millions m² de surface chauffée en 2015)	La grande diversité des activités du commerce se traduit par une grande **hétérogénéité des bâtiments**. À partir des années 1960, l'immobilier de commerce a connu une profonde mutation : d'un côté, le passage de la petite entreprise artisanale pratiquant la vente traditionnelle à la **grande entreprise de distribution**, de l'autre, la modification de la structure commerciale et du paysage commercial des villes (**essor des magasins de grandes et moyennes surfaces**). À partir de la fin des années 1980, on commence à constater un **découplage entre la dynamique de consommation et la croissance des surfaces commerciales**. Depuis les années 2000, on constate plusieurs évolutions concomitantes : **la baisse de l'attrait des hypermarchés, un certain regain du commerce de proximité, l'augmentation de la vacance commerciale, l'adaptation de l'offre commerciale** (les centres commerciaux entament une mutation vers les loisirs), un ralentissement de la construction et la croissance totale des surfaces commerciales, couplé à une augmentation des volumes vendus, et ce, quelle que soit la forme de commerce considérée. Le **développement du e-commerce** entraîne un fort développement de l'immobilier logistique.

Suite page suivante

Enseignement-recherche (187 millions m² de surface chauffée en 2015)	Le développement du secteur est concomitant de la **massification de l'éducation** (primaire et secondaire, puis supérieure) et du développement de l'économie de la connaissance. La construction de locaux d'enseignement a permis de répondre également à la croissance démographique et aux évolutions de l'aménagement du territoire (métropolisation). Plus de la moitié du parc d'enseignement a été construit entre les années 1960 et 1990. L'architecture des écoles a évolué, notamment pour accueillir **de plus en plus de salles aux fonctions spécifiques** en plus des salles de classes (salle informatique, bibliothèque, salle d'art plastique…). Les bâtiments d'enseignement présentent des spécificités (notamment un **usage fortement intermittent**), et des contraintes spécifiques en termes de rénovation énergétique (rénovation en site occupé ou pendant les congés).
Santé (114 millions m² de surface chauffée en 2015)	La France est le pays au monde où le nombre d'établissements de soins publics et privés rapporté à la population est le plus élevé : 3 200 pour 63 millions d'habitants (1/20 000 habitants), contre en moyenne 1/40 000 en Europe. **Les frontières dans la répartition des activités de soins se redessinent** depuis quelques années (tournant ambulatoire, spécialisation des plus gros établissements d'une région, concentration progressive de l'offre clinique…). **Le parc des bâtiments de santé est relativement ancien**, et son architecture a fortement évolué au fil des âges, de l'organisation pavillonnaire des hôpitaux anciens aux établissements compacts des années 1970. Aujourd'hui, l'architecture hospitalière doit évoluer pour prendre en compte l'évolution des techniques médicales (et notamment l'informatique biomédicale). L'obsolescence du bâti s'accélère. La dynamique de rénovation se heurte aux difficultés d'intervention en site occupé.
Habitat communautaire (70 millions m² de surface chauffée en 2015)	Depuis le milieu des années 2000, on note une augmentation du besoin concernant plusieurs types de public : **les personnes âgées, les personnes en difficulté sociale et les étudiants**. Les places d'hébergement proposées aux adultes et familles en difficulté sociale sont en augmentation de 39 % depuis 2012. La démocratisation de l'enseignement supérieur a entraîné une forte demande en logements étudiants, à ce stade encore non satisfaite, le principal frein étant le foncier. Le nombre de résidents en EPHAD est en augmentation d'environ 2,2 % par an et les résidences séniors connaissent un regain d'intérêt. **L'habitat communautaire prend une place de plus en plus importante dans la construction de logements neufs.**
Sports, loisirs, culture (71 millions m² de surface chauffée en 2015)	Les activités de sports, loisirs et culture se sont développées grâce à **l'augmentation du temps libre**, qui s'est traduit par une augmentation de la fréquentation des lieux culturels et de la pratique du sport (bien qu'elle se double d'une augmentation de la sédentarité). Dans les années 1970 et 1980, de vastes programmes gouvernementaux de construction d'équipements sportifs ont été lancés. Cependant, on constate à l'heure actuelle un décalage entre l'offre (équipements publics largement liée à l'organisation de compétitions) et la demande (pratiques pour des motivations hygiénistes et ludiques). En conséquence, des offres privées à caractère commercial se sont développées. Il existe encore en France des carences d'équipements (en piscines, notamment dans les quartiers prioritaires de la ville). Les **maisons de la jeunesse** (y compris les maisons de quartier) dominent le parc de bâtiments de loisirs et culture, tant en nombre qu'en surface. Malgré la hausse continue des surfaces dédiées à ces activités depuis les années 1980, il reste des territoires sous-dotés. Le Plan « Culture près de chez vous » identifie ainsi 86 bassins de vie considérés comme « zones blanches » (*i.e.* zones dans lesquelles il y a moins d'un équipement culturel public pour 10 000 habitants).

2.2. Parc bâti

2.2.1. La surface et le nombre de logements augmentent

Le parc de logements en France métropolitaine est en augmentation constante. **Depuis trente ans, le nombre de logements s'accroît de 1,1 % par an en moyenne**. Les logements individuels ont presque toujours représenté la majorité des logements construits entre 1980 et 2010, mais **la part des logements collectifs augmente** depuis les années 2010. Les logements vacants, les résidences secondaires et logements occasionnels participent de plus en plus à la croissance du parc [15].

La surface moyenne par personne a augmenté, passant de 25 m² en 1973 à 40 m² en 2013 pour les résidences principales. Corolaire de cette évolution, le **nombre de personnes par ménage a diminué de 2,6 en 1990 à 2,2 en 2016**. Cette tendance tend à s'amoindrir. La surface des maisons neuves continue d'augmenter (+ 1 % de 2006 à 2013 ; surface moyenne actuelle 112 m² ; 4,9 pièces en moyenne), mais celle des appartements stagne depuis 25 ans et recule même entre 2006 et 2013 (- 4 % ; surface moyenne actuelle 63 m² ; 2,9 pièces en moyenne) [8].

2.2.2. La hausse du parc tertiaire est tirée par les bureaux[4]

Depuis trente ans, **le parc tertiaire s'accroît en surface de 1,4 % par an en moyenne** [3]. Trois branches (commerce, bureaux et enseignement-recherche) ont contribué aux deux tiers de la croissance des surfaces chauffées. Leur développement a accompagné la tertiarisation de l'économie. Mais « ces éléments n'expliquent qu'une partie du développement. À titre d'illustration, l'emploi tertiaire a augmenté de 31 % entre 1990 et 2012 (données INSEE) tandis que les surfaces de bureaux ont augmenté de 59 % sur la même période (données CEREN).L'augmentation de l'offre d'immobilier tertiaire prend sa source dans la vague d'externalisation du patrimoine immobilier des entreprises. [Elle] s'explique par le rendement relativement élevé qu'ils présentent » [16]. **La surface moyenne par habitant a augmenté**, passant de 12 m² en 1990 à 15 m² en 2018.

2.3. Impacts environnementaux

Deux méthodes complémentaires permettent d'apprécier les pressions d'un secteur tel que celui du bâtiment sur l'environnement :

- **l'approche par l'empreinte environnementale**, qui englobe l'ensemble des impacts associés à la demande intérieure (en France), c'est-à-dire en prenant en compte les impacts environnementaux liés à l'importation de biens et services et en retirant ceux liés aux exportations. Il n'existe pas de suivi de long terme de l'empreinte environnementale des bâtiments en France. À titre indicatif, **en 2007, le logement était (avec le transport, l'alimentation et les services) un des quatre principaux postes de l'empreinte carbone des ménages français**. Il représentait alors 1,9 tCO_2eq (sur une empreinte totale de 12,2 tCO_2eq) et était stable depuis les années 1990 [17] ;

- **l'approche par inventaire**, qui compte les impacts physiquement créés à l'intérieur du pays, c'est-à-dire en intégrant l'impact des produits et services destinés à l'exportation, mais sans prendre en compte les importations. La consommation d'énergie et les émissions de GES présentés dans cette section relèvent de cette approche.

Il n'existe pas de vue d'ensemble des impacts environnementaux des bâtiments ni de leur évolution dans le temps. Selon les sujets, l'évolution des pressions exercées sur l'environnement par l'usage des bâtiments évolue de manière contrastée. Par exemple :

- **l'impact des bâtiments sur la qualité de l'air est orienté à la baisse**. Les secteurs résidentiel et tertiaire sont à l'origine de 52 % des émissions de particules de diamètre inférieur à 2,5 µm ($PM_{2,5}$), du fait du chauffage au bois, mais ces émissions sont en baisse depuis les années 1990. Elles sont passées de 222 kt en 1990 à 73 kt en 2015. Le bâtiment est la principale source d'émission d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), du fait du chauffage au bois. Il représente 81 % des émissions nationales. Là encore, ces émissions sont orientées à la baisse depuis les années 1990 (passant de 46 à 33 tonnes) [18] ;

4 Cette section concerne uniquement les secteurs CEREN.

- **les bâtiments exercent une pression à la hausse sur l'artificialisation des sols**. Entre 2006 et 2014, la surface au sol dédiée à l'habitat a progressé plus vite que la population et le nombre de logements (+ 11 %), celle dédiée au tertiaire (hors services publics et loisirs) a également très fortement augmenté (+ 22 %) [19].

2.3.1. Consommation d'énergie pour l'usage des bâtiments

RÉSIDENTIEL

Les consommations d'énergie associées à l'usage des logements sont en légère baisse depuis les années 1990 [6].

Les économies d'énergie dans les logements proviennent principalement du chauffage. La consommation unitaire d'énergie par logement pour cet usage a diminué de plus de 35 % depuis 2000. Les usages électriques spécifiques, après avoir fortement augmenté pendant des décennies, voient leur consommation se stabiliser depuis quelques années. Les gains d'efficacité contrebalancent la progression des usages. Concernant l'énergie de chauffage, le fait saillant est la baisse de la place du fioul, au profit du gaz de réseau et de l'électricité [6].

TERTIAIRE

Le secteur tertiaire présenté ici recouvre les branches du CEREN[5] ainsi que les activités ne faisant pas l'objet d'un suivi statistique annuel par le CEREN, mais incluses dans le secteur tertiaire (data centers, etc.)[6].

La consommation d'énergie associée à l'usage des bâtiments tertiaires a considérablement augmenté sur les dernières décennies, pour se stabiliser à partir des années 2010. La consommation unitaire de l'ensemble des branches tertiaires est globalement orientée à la baisse depuis les années 1980, ce qui explique que la hausse des surfaces n'ait pas été accompagnée d'une hausse comparable des consommations [3].

La part du chauffage dans la consommation d'énergie a diminué ces dernières années, passant de 55 % en 1990 à 46 % en 2016. Cela s'explique notamment par l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de chauffage et des performances thermiques des bâtiments, mais également par le développement de nouveaux usages plus énergivores tels que les équipements bureautiques, de communication et de climatisation dont la part est passée de 25 % en 1990 à 35 % en 2016 [3].

Les énergies de chauffage ont évolué : baisse de la part du fioul, augmentation de celle du gaz et, dans une moindre mesure, de l'électricité. La part du chauffage au gaz est plus importante dans l'enseignement, la santé et l'habitat communautaire [6].

2.3.2. Émissions de GES pour l'usage des bâtiments

Après une période de stabilité entre 1990 et 2005, **les émissions de CO_2 du secteur résidentiel** (y compris les émissions indirectes liées à la consommation d'électricité et de chauffage urbain) sont orientées à la baisse (- 26 % entre 2005 et 2017), du fait de la diminution du contenu carbone de l'énergie. Cette dynamique englobe deux tendances contrastées : l'une à la baisse des consommations unitaires (par m²), grâce à la rénovation énergétique et à l'introduction de logements neufs de moins en moins consommateurs, l'autre à la hausse en termes de surface [20].

Les émissions de CO_2 du tertiaire ont, pour leur part, augmenté de 6 % entre 1990 et 2017. La baisse du contenu carbone de l'énergie a en effet été contrebalancée par la hausse de la consommation de ce secteur [20].

5 Bureaux, cafés-hôtels-restaurants, commerce, enseignement-recherche, habitat communautaire, santé, sport-loisirs-culture, transports. Pour en savoir plus : www.ceren.fr.
6 Éclairage public, parties communes d'immeubles, entrepôts frigorifiques, armée, grands centres de recherche, télécommunication, secteur de l'eau, data centers. Les consommations de ces secteurs sont des consommations d'électricité.

3. Le bâtiment reflète des situations économiques et sociales contrastées

3.1. Parc bâti

3.1.1. La maison individuelle prime dans le résidentiel

Au 1er janvier 2018, il y avait **35,4 millions de logements en France métropolitaine**. Il s'agit principalement (à 56 %) de maisons individuelles. Les résidences principales représentent 82 % du parc, suivies par les résidences secondaires (10 %) et les logements vacants (8 %). Le statut d'occupation majoritaire des résidences principales est celui de propriétaire occupant (à 58 %). Le parc compte 23 % de locataires du parc privé et 17 % de locataires du parc social [21].

En 2018, 384 600 logements (hors résidences) ont été commencés, dont 57 % de logements collectifs [22]. **La France est le pays européen qui construit le plus de logements par habitant**, soit « un peu plus de 6 logements pour 1 000 habitants, contre environ 5 pour 1 000 en Finlande, Autriche et Luxembourg, qui présentent les taux de construction les plus dynamiques de l'Union et seulement un peu plus de 2 pour 1 000 au Royaume-Uni, où la construction neuve est, de longue date, très faible » [2]. Il n'existe pas d'appareil statistique public permettant de documenter le volume de logements démolis chaque année. Le recoupement de plusieurs sources (CGDD, CEREN) conduit à estimer qu'environ 90 000 logements sont détruits chaque année, sans garantie cependant sur la fiabilité de cette estimation.

Si les conditions de logement se sont améliorées en France depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, **4 millions de personnes sont encore considérées comme mal-logées**. S'y s'ajoute un « halo beaucoup plus large, aux contours parfois flous, de personnes affectées par la crise du logement, de manière moins prégnante, mais avec de réelles répercussions sur la vie de famille, la santé, l'environnement quotidien, le confort ou les fins de mois » [23]. Enfin, **20 % de la population vit dans un marché immobilier tendu**, c'est-à-dire présentant des valeurs élevées pour les indicateurs de suroccupation et de prix du m² rapporté aux revenus [24].

3.1.2. Un parc de bâtiments tertiaires très divers

Le parc actuel de bâtiments tertiaires (branches CEREN) représente **964 millions de m² de surfaces chauffées**[7], soit un ratio de 15 m² par habitant[8]. En France métropolitaine, les bureaux sont la branche tertiaire qui représente la plus grande surface (232 Mm²), suivie par le commerce (215 Mm²) et l'enseignement-recherche (190 Mm²) [3].

En termes de structure de propriété, la moitié (54 %) des actifs tertiaires sont détenus par les entreprises qui les occupent, 34 % par des collectivités territoriales, 14 % par des investisseurs institutionnels et 6 % par l'État et ses opérateurs publics [25].

3.2. Impacts environnementaux

Il n'existe pas de vue d'ensemble consolidée de l'impact environnemental du bâtiment en France. Cette section présente les chiffres clés des dimensions ayant fait l'objet de modélisations dans cet exercice.

3.2.1. Consommation d'énergie pour l'usage des bâtiments

RÉSIDENTIEL

Le secteur résidentiel de la France métropolitaine a consommé en **2015, 451 TWhEF$_{PCI}$**[9] (donnée non corrigée des variations du climat). Cela représente 30 % des consommations finales d'énergie (hors soutes) [26].

7 La surface chauffée diffère de la surface de plancher.
8 Étant donnée la diversité des bâtiments tertiaires et de leur mode d'occupation, il n'est pas possible de calculer une surface par occupant globale. L'indicateur de la surface par habitant a donc été choisi pour illustrer le lien entre la surface tertiaire et la population à laquelle elle rend service.
9 TWh énergie finale pouvoir calorifique inférieur.

Le parc actuel comporte une faible part de logements peu consommateurs. Sur les 29 millions de résidences principales au 1er janvier 2018, environ 1,9 million (6,6 % du parc) serait peu énergivore (étiquettes A et B du Diagnostic de Performance Énergétique – DPE). À l'opposé, environ 4,8 millions (soit près de 17 % du parc) sont très énergivores (étiquettes F et G du DPE) [27]. Le reste, environ 75 % du parc, a des consommations situées entre 90 et 330 kWhEP/m²/an (à titre de comparaison, l'exigence moyenne de la réglementation thermique 2012 pour le bâtiment neuf est de 50 kWhEP/m²/an). C'est le chauffage qui est l'usage le plus consommateur d'énergie (à 67 %), suivi par les usages spécifiques d'électricité (17 %) (en énergie finale) [3].

Il n'existe pas à ce jour de panorama exhaustif des rénovations énergétiques de logements en France. À titre d'illustration, en 2019, 2,3 millions de ménages propriétaires de maisons individuelles ont entrepris des travaux ayant effectivement conduit à une réduction de la consommation d'énergie conventionnelle finale dans leur logement, pour une économie estimée à 8,1 TWh/an [28].

TERTIAIRE

L'ensemble du secteur tertiaire de la France métropolitaine a consommé, en **2015, 274 TWhEF$_{PCI}$** (donnée non corrigée des variations du climat). Cela représentait 17 % de la demande d'énergie française (hors soutes) [26].

Dans les secteurs CEREN, **la première branche consommatrice est celle des bureaux**, qui représente 26,5 % des consommations, suivie par le commerce (22 %), la santé (12,3 %), l'enseignement-recherche (11,4 %) et les cafés-hôtels-restaurants (10,3 %). **Le chauffage est l'usage le plus consommateur d'énergie** (45,8 %), suivi par les usages spécifiques (26,5 %). **L'électricité est la première source d'énergie** : elle représente près de la moitié (48,9 %) des consommations du secteur, suivie par le gaz (31,8 %) [3].

Au total, la consommation unitaire moyenne du secteur (toutes énergies et tous usages confondus) s'élevait à **231 kWhEF$_{PCI}$/m²** (surface chauffée) en 2015 (France métropolitaine, données corrigées des variations climatiques) [3].

Les secteurs hors CEREN (éclairage public, parties communes d'immeubles, entrepôts frigorifiques, armée, grands centres de recherche, télécommunication, secteur de l'eau, data centers) représentaient en 2015 une consommation de 31,4 TWhEF[10] [3].

3.2.2. Émissions de GES pour l'usage des bâtiments

Les émissions directes de GES dans le bâtiment des secteurs résidentiel et tertiaire en France métropolitaine s'élevaient en 2015 à **70 Mt CO_2eq**, soit 16 % des émissions de GES totales (hors soutes, hors puits), auxquelles il faut ajouter **27 Mt CO_2** liées à la production et à la transformation d'énergie servant à alimenter les bâtiments (production d'électricité ou de chaleur *via* les réseaux de chaleur).

3.2.3. Consommation d'énergie dans le secteur industrie

Certaines des consommations d'énergie induites par l'activité dans le bâtiment sont comptabilisées dans le secteur de l'industrie. C'est le cas de la consommation d'énergie :

- pour la production de produits et d'équipements pour le bâtiment, estimée à 52 TWhEF en 2014 (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*) ;
- pour les chantiers (engins, locaux, etc.). Hors transport de personnes ou de matériaux en dehors du chantier, cette consommation est estimée à 11 TWhEF [29].

3.2.4. Consommation de matériaux de construction

La consommation de matériaux pour la construction neuve s'élève en 2015 à 43 Mt pour le résidentiel, 8 Mt pour le tertiaire (grandes surfaces commerciales, hôtel, enseignement, bureau) *(Tableau 3)*. Ce sont les granulats et le sable qui représentent la majorité des tonnages. Le ciment, la terre cuite et le plâtre sont également très présents dans le résidentiel [30].

10 Donnée corrigée du climat. La consommation des véhicules électriques est hors périmètre des données. Elle est traitée dans le chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*.

Tableau 3 Consommation de matériaux pour les bâtiments neufs en 2015 (milliers de tonnes)

	Résidentiel (inclus EPHAD)	Tertiaire (grandes surfaces commerciales, hôtel, enseignement, bureau)
Ciment	4 402	921
Sable	13 931	2 746
Granulats	18 045	3 626
Acier	679	323
Verre	95	40
Plastiques alvéolaires	88	22
Autres plastiques	230	21
Laines minérales	97	32
Isolants bois	17	5
Autres isolants biosourcés	8	0
Bois	920	119
Plâtre	1 341	155
Terre cuite	2 825	94
Ardoise	68	-
Zinc	1	0
Cuivre	21	4
Autres métaux	5	4
Autres matériaux	238	53
TOTAL	**43 030**	**8 190**

En 2015, la consommation de bois dans le bâtiment pour la construction et la rénovation (à la fois énergétique et non énergétique) s'élève à 4 223 Mm³. La rénovation représente 60 % de cette consommation (*cf.* *Tableau 48* pour le détail) [31].

3.2.5. Déchets du bâtiment

En 2015, les déchets du bâtiment se répartissaient comme suit :

- 5 460 Mt issus de la construction neuve ;
- 15 120 Mt issus de la rénovation ;
- 21 000 Mt issus de la démolition.

C'est donc la démolition qui est le plus gros générateur de déchets. Le réemploi est estimé à 0,550 Mt [32].

3.2.6. Émissions de polluants atmosphériques

Les émissions de particules liées aux activités domestiques, notamment dans les bâtiments d'habitation[11] et les bâtiments des entreprises, commerces, institutions et services publics[12] s'élèvent à :

- 74,7 kt en 2015 pour les PM_{10} (particules en suspension de diamètre inférieur ou égal à 10 µm), soit 34 % des émissions nationales ;
- 73,2 kt pour les $PM_{2,5}$ (particules en suspension de diamètre inférieur ou égal à 2,5 µm), soit 52 % des émissions nationales [33].

Les émissions proviennent majoritairement (à plus de 95 %) des logements. C'est la combustion liée au chauffage, à l'eau chaude sanitaire et à la cuisson qui est la source principale des émissions, à 80 %, suivie par les déchets et le brûlage domestique (15 %).

11 Combustion des appareils de chauffage, feux ouverts, engins mobiles non routiers pour le loisir/jardinage, utilisation domestique de solvants, réfrigération et air conditionné, consommation de tabac, traitement autonome des eaux usées, etc.
12 Combustion des appareils de chauffage, utilisation de solvants, réfrigération et air conditionné, bombes aérosols, utilisation de feux d'artifices, etc.

3.3. Quelles sont les grandes incertitudes prospectives ?

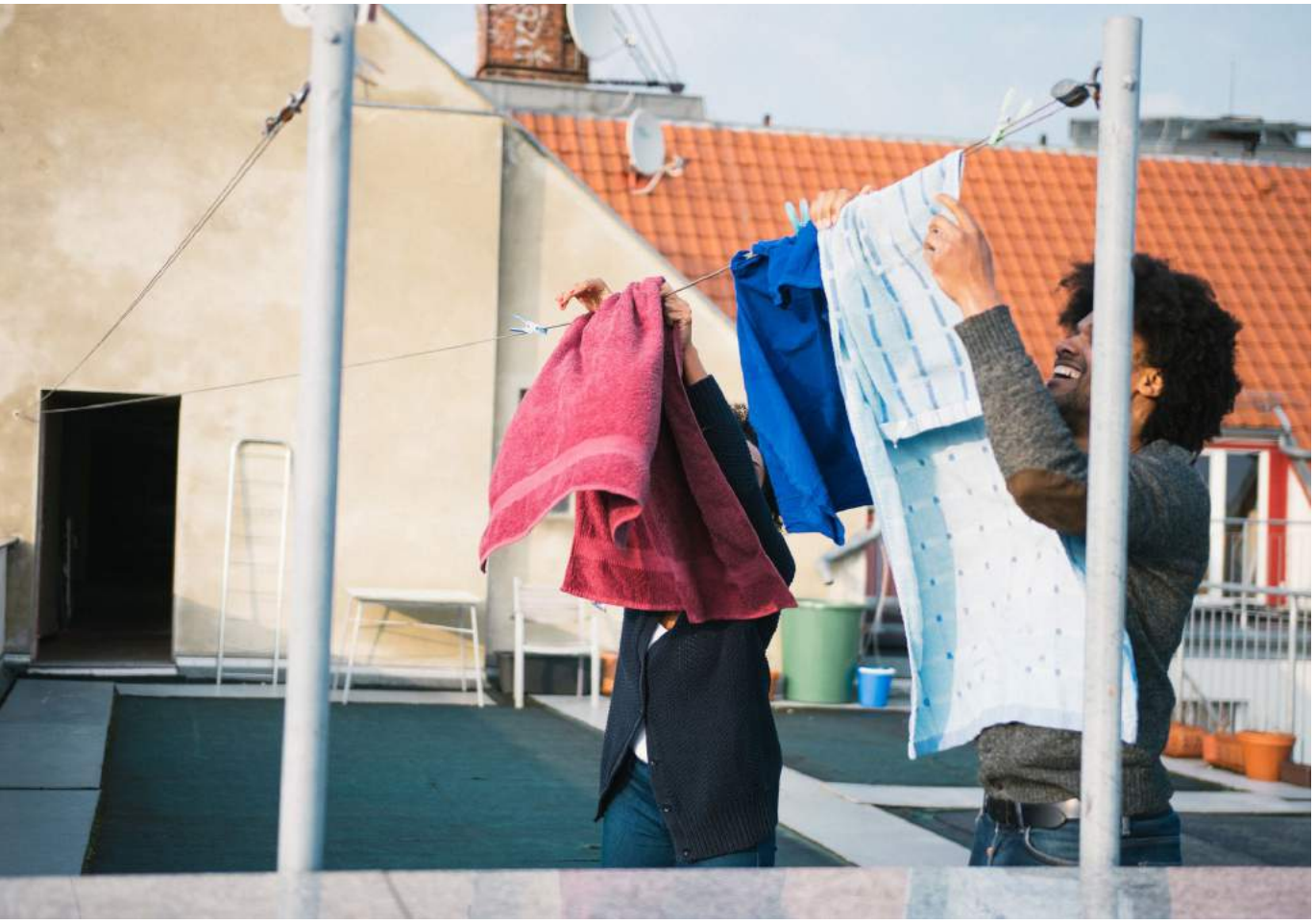
Les grandes incertitudes prospectives qui cadrent les scénarios sont, pour les logements :

- **Quelle stratégie de réponse aux besoins de logements ?** Répondra-t-on *via* la construction de logements neufs ou par l'optimisation du parc existant ?
- **Quelle évolution de la surface par personne ?** La tendance à l'augmentation de la surface par personne va-t-elle se prolonger, sous l'effet, notamment, du vieillissement de la population et des décohabitations ?
- **Quel rythme de rénovation énergétique ?** Et quelle ampleur de la rénovation de chaque logement ? Le terme « rénovation » peut recouvrir des réalités très différentes faisant écho à des stratégies de rénovation diverses : quelle sera la stratégie adoptée ?
- **Quelle évolution des modes de vie et quelle dynamique d'équipement associées ?** En particulier, quelle gestion des nouveaux usages de l'énergie au sein des bâtiments (climatisation, véhicules électriques[13]…) ? À quel point le numérique et l'intelligence artificielle transformeront-ils les pratiques et quelle part des usages (et leur consommations associées) migrera hors des logements dans le cloud ?

Le secteur tertiaire se caractérise par la grande diversité de ses sous-secteurs, chacun étant impacté par des tendances de fond ou émergentes et des incertitudes prospectives propres *(Tableau 4)*.

À cela s'ajoutent deux questions transversales :

- **Quelle mise en œuvre et quel impact de l'économie circulaire ?**
- **Quelles stratégies d'adaptation au changement climatique ?**



13 Les consommations d'énergie du véhicule électrique ne sont pas traitées dans la modélisation du secteur « Bâtiment ». Elles sont intégrées dans le secteur « Transports ».

Tableau 4 *Vue d'ensemble des dynamiques pour chaque sous-secteur tertiaire*

	Tendances récentes	Tendances lourdes à 2050	Incertitudes prospectives
Bureaux	• Intensification des usages (ex. : les postes de travail libres des entreprises tertiaires qui servent à accueillir d'autres professionnels *via* des plateformes spécialisées) • Réflexions émergentes sur la réversibilité des espaces et les changements d'usage (ex. : transformation de bureau en logement) • Nouveau rapport à l'espace de travail pendant la crise sanitaire de 2020	• Tertiarisation de l'économie	• Nombre d'emplois de bureaux demain, au regard d'évolutions technologiques comme l'intelligence artificielle, ou des besoins d'emplois liés à la transition écologique • Impact des grandes orientations d'aménagement de demain sur la localisation des bureaux • Évolution du travail (télétravail, précarisation de l'emploi…) et organisation des espaces associée • Rythme de rénovation énergétique
Cafés-hôtels-restaurants	• Secteur impacté par la crise sanitaire de 2020 • Tourisme durable • Voyage virtuel • Réactions au « sur-tourisme » dans certaines villes très visitées • Restaurants : apparition de bistros ruraux multi-services, retour du « fait maison »	• Augmentation de la demande touristique mondiale • Vieillissement de la population française • Impact du changement climatique sur le tourisme	• Rythme de rénovation énergétique Restaurants : • Évolution de la restauration hors domicile « utilitaire » • Évolution des services offerts par les restaurants (numérique…) Hôtels : • Demande de tourisme • Évolution de l'image du voyage • Impact du changement climatique sur le tourisme • Évolution des modalités de voyage (destinations, longs *vs* courts séjours, à l'hôtel *vs* chez l'habitant…)
Commerces	• Vieillissement et mutation des centres commerciaux • Transformation des magasins physiques et importance de l'« expérience client » • Développement des commerces dans les lieux de mobilité (gares, aéroports) • Avènement des projets mixtes, mêlant habitat, commerces et bureaux, notamment dans les grandes métropoles	• Vieillissement de la population • Maturité de nombreux postes de consommation • Fin du modèle de croissance extensif : ralentissement de la construction neuve • Transformation numérique du commerce et mutations immobilières associées (croissance du nombre d'entrepôts)	• Vieillissement de la population • Maturité de nombreux postes de consommation • Fin du modèle de croissance extensif : ralentissement de la construction neuve • Transformation numérique du commerce et mutations immobilières associées (croissance du nombre d'entrepôts) • Rythme de rénovation énergétique
Enseignement-recherche	• Intensification des usages (écoles mises à disposition d'associations le soir et le week-end) • Émergence de la scolarisation à domicile • Individualisation des parcours de formation dans la formation continue	• Généralisation de l'éducation primaire et secondaire • Développement de l'enseignement supérieur	• Localisation des apprentissages • Place du numérique dans l'enseignement • L'économie de demain sera-t-elle toujours une économie de la connaissance ? • Rythme de rénovation énergétique
Santé	• Déserts médicaux • Baisse du nombre de médecins • Hospitalisation à domicile • *Quantified self* (automesure connectée)	• Augmentation des besoins de santé (liée notamment au vieillissement de la population) • Arrivée du numérique dans la santé	• Évolution de l'organisation des prises en charge, répartition entre hôpital, médico-social et médecine de ville • Architecture et nouveaux services dans les hôpitaux de demain • Rythme de rénovation énergétique • Gestion de l'obsolescence des bâtiments de santé
Habitat communautaire	• Augmentation du besoin lié au vieillissement de la population • Nouvelles formes d'habitat pour séniors autonomes leur permettant de rester dans le parc résidentiel (colocation intergénérationnelle, colocation) • Augmentation des besoins en hébergement de personnes en difficulté sociale	• Augmentation du besoin lié au vieillissement de la population	• Lieu de vie des personnes âgées • Réponse aux besoins liés à l'hébergement étudiant • Besoins d'hébergement pour les personnes en difficulté sociale • Niveau de service de l'hébergement communautaire • Rythme de rénovation énergétique
Sports, loisirs, culture	• Réalité augmentée, expos virtuelles… • Quelques expériences de mise à disposition de locaux scolaires pour usages sportifs, associatifs… • Concerts en appartement…	• Temps libre disponible qui permet la réalisation d'activités culturelles et sportives • Fréquentation des lieux culturels • Vieillissement de la population	• Place pour le numérique dans les loisirs de demain • Place de l'impact environnemental dans les choix de pratiques culturelles et sportives • Degré de spécialisation des lieux de culture et de sport • Rythme de rénovation énergétique

4. Méthode et outils de quantification des scénarios

La méthodologie de construction des scénarios a suivi deux grandes étapes : d'une part, l'écriture des récits et d'autre part, la modélisation. Elles ont été menées par itération, pour assurer la cohérence entre histoires et ordres de grandeur, mais aussi la cohérence avec les autres secteurs (industrie, système électrique, réseau de gaz…).

4.1. Écriture des récits

L'écriture de récits a permis, par le biais d'échanges internes et externes, de décrire la manière dont la philosophie globale des scénarios se traduisait sur des aspects spécifiques au bâtiment. Par exemple, sur la construction neuve, la dynamique de rénovation, les actions d'adaptation du bâti au changement climatique, les pratiques de consommation d'énergie dans le foyer… Cette réflexion a notamment été alimentée par la boîte à outils prospective « Imaginons Ensemble les Bâtiments de demain » développée par le CSTB et l'ADEME. Ces récits seront consignés dans des Cahiers d'hypothèses.

4.2. Modélisation

Les récits ont fait l'objet de modélisation afin d'obtenir des ordres de grandeur pour les illustrer et valider leur inscription dans une trajectoire bas carbone.

Deux types de modèles ont été utilisés :

- **une suite de modèles spécifiques au domaine du bâtiment**, pour calculer les impacts énergie et ressources. Lorsque les modèles existants ne couvraient pas certains sujets (résidences secondaires, data centers…), **des compléments de modélisation** ont été développés *(Tableau 5)* ;

- **des modèles transversaux ou spécifiques** à d'autres secteurs, qui permettent d'analyser la contribution du secteur du bâtiment à des enjeux plus larges (impacts macroéconomiques *via* le modèle ThreeME, besoins d'investissement *via* le modèle d'I4CE…) ou des enjeux spécifiques à d'autres branches d'activités (par exemple, la consommation d'énergie de l'industrie liée à la construction et la rénovation *via* le modèle PEPITO, ou encore la production de déchets du bâtiment).

Pour alimenter ces modélisations, de nombreuses sources de données ont été mobilisées dans la littérature ou auprès d'experts sectoriels. Les données de projection sur le nombre de ménages ont été mises à disposition par l'INSEE. Les données de consommation du secteur tertiaire se basent sur le CEREN. Certaines données comme la consommation d'énergie de la climatisation, celle du chauffage au bois dans le résidentiel par exemple, ont fait l'objet d'une mise à jour par rapport aux données du Bilan de l'énergie, des estimations plus récentes étant disponibles (*cf.* chapitre *1.1 Ambitions, objectifs, méthodes* et [34]).

Tableau 5 Modèles spécifiques au secteur bâtiment utilisés

Nom du modèle	Secteur	Thème	Périmètre géographique	Horizon temporel	Lien avec les autres modèles	Développé/opéré par
MODÈLES						
ANTONIO (trANsiTiON écologIque des lOgements)	Résidentiel	Consommation d'énergie Usages : chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, usages spécifiques, éclairage, ventilation et auxiliaires	France métropolitaine	2050 Pas de temps de 10 ans	Calculs en propre, et intégration des résultats de USE 2 et de MICO résidentiel	Développé par Énergies Demain, Enerdata et I Care & Consult Mis à jour et opéré par Énergies Demain, Enerdata et Pouget Consultants
OTELO (Outil pour la TErritorialisation de la production de LOgements)	Résidentiel	Besoin en logements	France métropolitaine	2050	Intégré dans ANTONIO sous forme de module spécifique	Mis à disposition par la DHUP
USES 2	Résidentiel	Consommation d'énergie des usages spécifiques	France métropolitaine	2030 Pas de temps de 5 ans	Résultats 2030 intégrés à ANTONIO	Développé par Énergies Demain, Édouard TOULOUSE, Sophie ATTALI et le CRÉDOC Mis à jour et opéré par Édouard TOULOUSE et Sophie ATTALI
MICO (Modélisation des Impacts de la Climatisation sur la consommation)	Résidentiel, tertiaire	Consommation d'énergie et émissions de GES Usage : climatisation de confort (process exclu)	France entière	2050 Pas de temps de 10 ans	Résultats France métropolitaine intégrés à ANTONIO et VIVALDI	Développé et opéré par CODA Stratégies
VIVALDI	Tertiaire	Consommation d'énergie Usages : chauffage, eau chaude sanitaire, autres usages thermiques, climatisation, cuisson, usages spécifiques Éclairage public	France métropolitaine	2050 Pas de temps de 10 ans	Calculs en propre sauf pour l'usage climatisation : intégration des résultats de MICO tertiaire	Développé et opéré par l'ADEME
RENOMAT	Résidentiel	Consommation de matériaux et production de déchets liée à la rénovation énergétique BBC des logements	France métropolitaine	2050 Pas de temps de 10 ans		Développé par TBC Innovations Opéré par l'ADEME
CONSOMAT	Résidentiel (résidences principales, EPHAD inclus), tertiaire CHEB (commerces de grande distribution, hôtels, enseignement, bureaux)	Consommation de matériaux liée à la construction neuve	France métropolitaine	2050 Pas de temps de 10 ans		Développé par le CSTB Opéré par l'ADEME
RECOBOIS		Consommation de bois dans le bâtiment	France métropolitaine	2050 Pas de temps de 10 ans		Calculs effectués par l'ADEME à partir d'une méthodologie BIPE/ FCBA développée pour le CODIFAB [31]
COMPLÉMENTS DE MODÉLISATION						
Data centers hébergeurs	Tertiaire	Consommation d'énergie des data centers de colocation (data centers propres aux entreprises exclus)	France métropolitaine	2050	Résultats intégrés dans les résultats du modèle VIVALDI	ADEME
Consommation d'énergie des chantiers	Industrie	Consommation d'énergie sur les chantiers (engins, locaux, etc.), hors transport de personnes ou de matériaux en dehors du chantier	France métropolitaine	2050	Résultats intégrés dans les consommations de l'industrie (dans le bilan)	Enerdata
Consommation des logements hors résidences principales	Résidentiel	Consommation des résidences secondaires et des logements vacants	France métropolitaine	2050	Intégré aux consommations résidentielles	ADEME

Encadré 1 Définitions de la rénovation adoptées dans cet exercice

Dans le modèle ANTONIO utilisé pour cet exercice, les rénovations sont modélisées en deux temps : d'une part l'intervention sur l'enveloppe du bâtiment, d'autre part le changement d'équipements de chauffage et d'eau chaude sanitaire.

Divers niveaux d'intervention sur l'enveloppe sont représentés pour prendre en compte le fait que celle-ci peut être plus ou moins ambitieuse et inscrite dans une trajectoire de performance à terme (pour plus d'information sur les modalités d'atteinte du BBC Rénovation [35]). Ils sont classés comme suit, par ordre décroissant de performance de l'enveloppe[14] :

- **rénovation au niveau passif** (entendue comme permettant d'atteindre un besoin de chauffage de 25 kWhEF/m²/an) ;
- **rénovation permettant d'atteindre le BBC Rénovation en une fois** (autre appellation possible : rénovation complète et performante/rénovation globale), entendue comme permettant d'atteindre un besoin de chauffage de 45 kWhEF/m²/an ;
- **rénovation permettant d'atteindre le BBC Rénovation par étapes** (autre appellation possible : rénovation performante par étapes/rénovation par étapes performante à terme), entendue comme permettant d'atteindre un besoin de chauffage de 56 kWhEF/m²/an en maison individuelle et 52 kWhEF/m²/an en logement collectif ;
- **rénovation de l'ensemble de l'enveloppe, mais sans inscription dans une trajectoire de performance** et donc ne permettant pas d'atteindre le BBC Rénovation, entendue comme permettant d'atteindre un besoin de chauffage de 68 kWhEF/m²/an en maison individuelle et 63 kWhEF/m²/an en logement collectif ;
- **rénovation partielle de l'enveloppe**.

Encadré 2 Le choix des vecteurs énergétiques

Les usages thermiques (chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, cuisson…) peuvent reposer sur plusieurs vecteurs énergétiques (fioul domestique, bois, réseau de gaz, réseaux de chaleur/froid, électricité, géothermie, solaire…). Les vecteurs ont été choisis en fonction de la philosophie générale des scénarios. Par exemple, un scénario reposant sur des énergies locales (S1) se prête plus à l'usage du bois, des scénarios de développement des villes moyennes ou de métropolisation (S2 et S3) sont propices aux réseaux de chaleur, des scénarios de forte électrification du chauffage et d'innovation technique (S3 et S4) permettent le développement de pompes à chaleur (PAC) hybrides pour gérer la pointe électrique. Le nombre final de logements concernés par type d'équipement a été établi par itération avec la disponibilité des différents vecteurs et leur niveau de décarbonation (*cf.* chapitres ***2.3.1. Mix gaz*** et ***2.3.2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux***).

14 L'estimation du besoin thermique correspondant aux différents niveaux de rénovation a été établie à dire d'expert.

4.3. Études complémentaires

4.3.1. Quelles visions stratégiques de la filière construction neuve, dans une France neutre en carbone en 2050 ?

La construction neuve représente un enjeu spécifique pour la transition énergétique, notamment à travers le volume de construction, l'évolution des matériaux et des modes constructifs, ainsi que des techniques de mise en œuvre et les emplois dédiés. Les scénarios de neutralité peuvent s'interpréter de façon différente pour ce secteur d'activité : depuis une limitation forte de la construction neuve, jusqu'à des stratégies de gestion de l'obsolescence par une déconstruction-reconstruction.

Pour analyser plus en détail ces potentiels, un travail spécifique a été réalisé dans S2 et S3 par TBC Innovations, en groupement avec le CODEM et David Abonneau et en consultant les parties prenantes de la filière. Il décrit les grandes étapes de transformation de cette dernière ainsi que les stratégies des entreprises clés pour atteindre les objectifs de la vision 2050. Il fera l'objet d'un feuilleton (*cf.* chapitre ***1.1. Ambitions, objectifs, méthodes***).

4.3.2. Analyse de la vulnérabilité climatique des scénarios

Un projet séparé a également été réalisé pour identifier le risque climatique auquel le parc bâti sera soumis à l'horizon 2050. La description de solutions d'adaptation mises en œuvre dans chaque scénario a notamment permis de qualifier la vulnérabilité du parc de bâtiments face aux aléas climatiques (vague de chaleur, retrait gonflement des argiles, inondations…). Cette analyse a été réalisée par l'Observatoire de l'Immobilier Durable. Elle fera l'objet d'une publication spécifique.

4.3.3. Impact des scénarios sur l'artificialisation des sols

Une évaluation de l'impact des scénarios sur l'artificialisation des sols a été réalisée par le CGDD. Elle fera l'objet d'un feuilleton (*cf.* chapitre ***1.1. Ambitions, objectifs, méthodes***).

4.3.4. Analyse des évolutions des émissions de polluants

Une évaluation de l'impact des scénarios sur 6 polluants (SO_2, NO_x, PM_{10} et $PM_{2,5}$, COV et NH_3) a également été réalisée par le CITEPA. Elle fera l'objet d'un feuilleton (*cf.* chapitre ***1.1. Ambitions, objectifs, méthodes***). Une analyse préliminaire, qualitative, sur le seul périmètre du résidentiel, est présentée ici.

5. Les scénarios explorent des stratégies bien distinctes

Les scénarios explorent à des degrés divers les leviers d'action de transition. Le *Tableau 6* synthétise la manière dont chaque scénario se positionne.

Tableau 6 Intensité des leviers d'action explorés dans chaque scénario

Levier	TEND	S1	S2	S3	S4
À L'ÉCHELLE DU PARC (OU DU QUARTIER)					
Sobriété (limiter la surface par personne)		++++	+++		
Efficacité (optimiser l'usage du parc existant)		++++	+++		
Énergies ou matériaux moins impactants (développer les réseaux de froid et de chaleur urbaine)	+	+	+++	+++	+
Compensation (capter et stocker le carbone pour compenser les émissions du secteur bâtiment)			+	+	++++
À L'ÉCHELLE DU BÂTIMENT ET DE SES OCCUPANTS					
Sobriété					
Utiliser moins d'équipements		++++	+++		-
Mieux dimensionner les équipements		+++	++	-	--
Moins utiliser les équipements		+++	++	-	--
Efficacité					
Baisser le besoin thermique du bâtiment	+	++++	+++	+++	++
Améliorer le rendement des équipements	+	++	++	++++	++++
Réemployer, réutiliser, recycler les matériaux et équipements	+	+	+	++	+
Utiliser des énergies ou des matériaux peu impactants pour l'environnement					
Changer le vecteur énergétique	+	++++	++++	++++	+
Adopter des modes constructifs avec des matériaux et équipements moins impactants	+	++++	+++	++	+
Compenser les impacts résiduels					
Compenser les émissions carbone des bâtiments neufs				+++	++++
Stocker le carbone dans les matériaux	+	+++	++++	++	+

5.1. Scénario tendanciel : une lente adaptation

5.1.1. Philosophie globale

Le scénario tendanciel prolonge les stratégies d'adaptation du bâti adoptées jusqu'en 2020 : lente amélioration du parc, réponse aux besoins par la construction neuve, augmentation de la surface par personne et spécialisation des surfaces.

Les actions menées en faveur de la transition énergétique recouvrent plusieurs piliers :

- la baisse du besoin énergétique des bâtiments, obtenue *via* la rénovation, mais pas *via* la sobriété des pratiques quotidiennes des occupants :
  - **la rénovation énergétique des bâtiments se poursuit, mais sans parvenir à placer le parc sur une trajectoire bas carbone**. Dans le tertiaire, elle accélère sous l'effet du Dispositif Éco Énergie Tertiaire, mais sans en atteindre les objectifs, les assujettis ayant souvent recours à la clause de modulation des objectifs. Dans le résidentiel, elle prolonge la tendance à intervenir sur les différents postes de travaux (murs, fenêtres…) sans s'inscrire dans une trajectoire de performance ;
  - dans une logique de prolongation des tendances passées, **la performance énergétique des bâtiments neufs progresse**, grâce à la réglementation qui évolue pour intégrer, au fil de l'eau, de nouveaux enjeux environnementaux ;

- l'amélioration tendancielle de l'efficacité des équipements, grâce aux progrès techniques et aux réglementations (notamment sur les produits blancs et bruns). La durée de vie moyenne des équipements reste sensiblement stable. Les comportements d'usage des équipements aussi ;

- le recours à des énergies faiblement carbonées, notamment *via* l'électrification du chauffage et de l'eau chaude sanitaire. La tendance ne permet cependant ni une diversification des sources d'énergies peu impactantes, ni la sortie des énergies fossiles.

Dans leur ensemble, les évolutions tendancielles ont en commun **une faible prise en compte des enjeux énergétiques dans les modes de vie**. Les évolutions de l'immobilier sont ainsi tirées par d'autres facteurs comme le vieillissement de la population, l'accroissement du temps libre ou le développement du numérique. L'essor du numérique et le déploiement de nouveaux réseaux de communication poursuivent leur rythme actuel, avec pour corollaire une forte croissance du volume de données à traiter. Le confort continue de se traduire par une multiplication d'équipements connectés.

La part du fioul, du gaz de réseau et de l'électricité par effet Joule (radiateurs électriques) dans les énergies de chauffage des logements baisse, celle des réseaux de chaleur urbaine et du bois reste constante. **Les usages thermiques s'électrifient par recours à la pompe à chaleur** qui équipe 35 % du parc de logements en 2050 (soit 11,8 millions de logements, contre 4 % en 2015). Dans le tertiaire, les surfaces chauffées au fioul domestique deviennent résiduelles en 2050, au profit de l'électricité (pompes à chaleur) et des réseaux de chaleur. La part des surfaces chauffées au gaz ne varie pas (*cf.* chapitres *2.3.1. Mix gaz* et *2.3.2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux*).

Les modes constructifs évoluent peu et recourent majoritairement à des solutions à base de béton. Seul le marché de la construction neuve a recours à plus de matériaux bois et biosourcés.

Les stratégies d'adaptation du parc au changement climatique sont marquées par **une faible anticipation et gestion des risques nouveaux**. La responsabilité des choix d'adaptation est laissée aux commanditaires. Ce qui freine toute coordination à l'échelle nationale et alimente une inégalité entre les territoires.

5.1.2. Hypothèses

Les principales hypothèses du scénario tendanciel sont présentées dans le *Tableau 7*.

Tableau 7 Scénario tendanciel – narratif

Ensemble des bâtiments	
Réglementation environnementale des bâtiments neufs	La réglementation évolue pour intégrer, au fil de l'eau, de nouveaux enjeux environnementaux.
Modes constructifs	• **Matériaux.** Les modes constructifs évoluent peu et recourent majoritairement à des solutions à base de béton. Seul le marché de la construction neuve a recours à plus de matériaux bois et biosourcés (*cf.* chapitres ***2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*** et ***2.4.3. Puits de carbone***). • **Techniques de mise en œuvre. La préfabrication se développe**, sans toutefois devenir dominante. • **Gestion des chantiers**. L'efficacité énergétique des chantiers s'améliore lentement, notamment grâce à de meilleures pratiques de conception rendues possibles par la maquette numérique. Le réemploi des produits et matériaux de construction se développe.
Adaptation au changement climatique	Les stratégies d'adaptation du parc au changement climatique sont marquées par une faible anticipation et gestion des risques nouveaux. La responsabilité des choix d'adaptation est laissée aux commanditaires. Ce qui freine toute coordination à l'échelle nationale et alimente une inégalité entre les territoires (*cf.* chapitre ***1.3. Adaptation au changement climatique***).
Résidentiel	
Logements neufs	• **Volume de construction de logements neufs**. Baisse du nombre annuel de logements construits. Le besoin en logements baisse, du fait du ralentissement de la croissance démographique. C'est la décohabitation liée au vieillissement qui est le facteur majeur de demande. On répond à ce besoin par la construction neuve et par la résorption de la vacance en zone tendue. • **Typologie des logements neufs**. Les logements construits varient peu (les maisons individuelles continuent à représenter une part importante de la construction neuve). • **Qualité thermique**. Poursuite du rythme historique d'amélioration des performances énergétiques des logements. Dans les années 2040-2050, la quasi-totalité des logements construits sont à un niveau BEPAS+[15]. • **Équipement et énergies d'Eau Chaude Sanitaire** : disparition du fioul et du gaz, développement des chauffe-eau thermodynamiques. L'électricité Joule reste résiduelle dans les maisons individuelles, disparaît des logements collectifs. • **Équipements et énergie de chauffage**. Arrêt du gaz au profit des EnR électriques notamment des pompes à chaleur. • **Rafraîchissement/climatisation**. Augmentation de l'équipement des logements neufs en pompes à chaleur réversibles, sous l'influence de la RE2020.
Logements existants	• **Politique de rénovation énergétique des logements**. La politique de rénovation se concentre sur la rénovation geste à geste, qui s'inscrit peu à peu dans une trajectoire basse consommation et qui peine à massifier les rénovations performantes. • **Besoins et qualité thermique**. Le besoin de chaud diminue légèrement sous l'effet de rénovations de l'enveloppe du bâti peu ambitieuses qui viennent contrebalancer une plus grande présence des ménages chez eux (vieillissement de la population…). Le besoin de froid augmente sous l'effet combiné d'un bâti peu isolé et d'un recours généralisé à la climatisation. Les populations qui se restreignent (en hiver comme en été) sont celles en situation de précarité énergétique. • **Équipements et énergies de chauffage**. Poursuite de la tendance à la baisse du fioul, qui devient résiduel en 2050 et à l'électrification du chauffage (*via* les pompes à chaleur). Baisse du nombre de logements équipés de chaudière gaz, développement des PAC hybrides. Au final, le nombre de logements raccordés au réseau de gaz reste stable. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Pour les systèmes non combinés, le chauffe-eau thermodynamique prend le relais de l'effet Joule dans la production d'eau chaude sanitaire. Peu de production *via* le solaire. • **Rafraîchissement/climatisation**. La climatisation se généralise. Au fur et à mesure des vagues de chaleur, des appareils peu performants de type climatiseurs mobiles sont installés dans les logements. De nouvelles technologies très efficaces apparaissent, fruit de la R&D d'un secteur en pleine expansion, mais elles restent résiduelles.
Vie quotidienne	• **Volume d'eau chaude sanitaire par personne**. Le besoin (m³/jour/pers.) n'évolue pas. • **Température de consigne de chauffage**. La température de consigne moyenne n'évolue pas. • **Produits blancs**. La consommation énergétique diminue progressivement mais lentement, grâce aux politiques européennes et aux progrès d'efficacité énergétique. L'absence d'évolution des comportements vers plus de sobriété ne permet pas de gains plus importants. • **Produits bruns et gris**. Augmentation des usages du numérique au quotidien et des flux de données associés, que vient soutenir le développement des infrastructures mobiles (5G, 6G…) et fixes (fibre FTTH). Par exemple : mobilité, réalité virtuelle, cloud gaming, éducation, travail à distance, usages dans le domaine de la santé, de l'autonomie des personnes âgées… • **Éclairage**. L'efficacité progresse beaucoup grâce au passage au tout LED dans l'éclairage. Cela permet une diminution substantielle de la consommation globale des sources de lumière, même si les besoins sont accrus en raison du vieillissement de la population et qu'il existe un effet rebond difficilement quantifiable (augmentation du nombre de points lumineux pour éclairer son jardin, devant le garage…). • **Cuisson**. Les ménages mangent plus souvent à la maison que par le passé (télétravail, vieillissement), mais à partir d'aliments plus transformés/préparés. Les petits équipements de cuisson spécialisés (robots…) se multiplient. L'efficacité énergétique des appareils s'améliore, mais les puissances remontent légèrement à cause de la généralisation des appareils connectés, pilotables à distance… L'électrification de la cuisson se poursuit.

Suite page suivante

15 Bâtiment à énergie passive. Dans le modèle ANTONIO, ce niveau correspond à un bâtiment dont le besoin est de 10 kWhEF/m²/an.

Tertiaire	
Bureaux	Dans un contexte où l'entreprise comme lieu physique perd de sa centralité et où le nomadisme se développe, les bureaux restent au cœur des métropoles.
Cafés-hôtels-restaurants	Le tourisme continue à se développer malgré ses impacts environnementaux et les premiers effets du changement climatique. Ce dernier réoriente les flux touristiques mais sans les remettre en cause. L'image du voyage change peu et reste associée aux destinations lointaines. L'offre des hébergements monte en gamme. L'offre des restaurants évolue pour répondre au mode de vie urbain (offre à emporter, livraison à domicile, à toute heure du jour et de la nuit).
Commerces	La consommation de biens reste au cœur de la société. Cependant, dans une société vieillissante et de plus en plus préoccupée par l'environnement, les postes arrivés à maturité ces dernières années (habillement, équipements de la maison…) ne progressent plus. Quelques « poches » de consommation maintiennent une croissance (Technologies de l'Information et de la Communication (TIC)…). Cela s'accompagne par un fort développement du e-commerce, les quelques centres commerciaux restant achevant leur mue vers le commerce expérientiel. Une complémentarité s'instaure entre canaux physiques et numériques. Les commerces de proximité, notamment alimentaires, se développent.
Enseignement-recherche	Les établissements d'enseignement sont de plus en plus spacieux. Ils se spécialisent sur leur fonction d'enseignement.
Santé	Les besoins en bâtiment de santé suivent les évolutions démographiques, sur le même rythme que par le passé, sans attention particulière à limiter la surface par personne. La numérisation des établissements de santé se poursuit. Les établissements médicaux développent de nouveaux services (vastes zones d'accueil et de réception, magasins, restaurants, jardins paysagers…). La gestion de l'obsolescence se fait par déconstruction/reconstruction en priorité, puis par le changement d'usage et la rénovation.
Habitat communautaire	L'habitat communautaire se développe pour répondre aux besoins liés au vieillissement de la population, aux besoins des étudiants et des personnes en difficulté sociale. Les services offerts tirent à la hausse les consommations d'énergie (domotique, objets connectés…).
Sports, loisirs, culture	Les activités du temps libre se développent, portées par l'essor du numérique, la croissance du pouvoir d'achat, du temps libre des ménages et le vieillissement de la population. Elles évoluent sans attention particulière à leur impact environnemental. Le numérique en devient le pilier. Le niveau de confort et de spécialisation des équipements augmente. Le niveau de confort des installations augmente (ex. : piscines transformées en lieu de santé et bien-être types spa), les salles de sport privées continuent leur essor et se transforment en salles de sport gamifiées, connectées, avec des machines high-tech permettant de définir des parcours individualisés, de s'immerger dans des réalités virtuelles…).
Data centers hébergeurs	Très forte augmentation de la consommation énergétique. Le volume de données hébergées croît fortement, particulièrement dans les petits data centers (sous l'influence de la 5G et de l'Internet des objets). L'efficacité énergétique s'accroît, mais sans compenser la hausse du volume de données. • **Volume de données**. Le volume de données des petits data centers (5G, Internet des objets…) est de 4,21 exabytes (EB) en 2020. Il croît de 50 % par an jusqu'en 2025, puis de 40 % de 2026 à 2040. Cette croissance diminue ensuite par palier pour atteindre 30 % à partir de 2043 jusqu'en 2050. Le volume de données des gros data centers (hyperscale, gros hébergeurs…) est de 107,65 EB en 2020. Il croît de 15 % par an jusqu'en 2050. • **Type de data centers**. Développement du edge computing, croissance plus importante des petits data centers pour l'Internet des objets et la 5G. Les gros data centers continuent leur croissance avec des besoins de stockage de plus en plus importants et l'externalisation des applications d'entreprise. • **Efficacité énergétique de la partie informatique**. L'efficacité de traitement des données des petits data centers et des gros augmente de 13 % par an jusqu'en 2050, à partir de respectivement 27,38 GWh/EB et 8,66 GWh/EB. • ***Power Usage Effectiveness* (PUE)**[16]. Le PUE des petits data centers est de 2,10 en 2020 et diminue de 2 % tous les ans (= 1,15). Le PUE des gros data centers est de 1,80 en 2020 et diminue de 2 % par an tous les ans pour atteindre le palier de 1,02 à partir de 2048.

5.1.3. Dynamique du parc à 2050

RÉSIDENTIEL

En 2050, le parc de logements est constitué de 34 millions de résidences principales, auxquelles viennent s'ajouter 7 millions de résidences secondaires et logements vacants. **Au final, 29 % du parc de résidences principales (soit 10 millions de logements) a été construit après 2015**. En moyenne, 282 000 logements sont construits par an entre 2015 et 2050. Le rythme de construction décroît : il atteint une moyenne de 179 000 logements par an sur la période 2040-2050. Environ 91 000 logements sont détruits par an en moyenne. La quasi-totalité (99 %) des logements existants en 2015 et non démolis ont fait l'objet d'une rénovation énergétique plus ou moins marquée. Dans le détail, 16 % ont été rénovés à un niveau BBC Rénovation ou plus, 29 % ont fait l'objet d'une rénovation touchant l'ensemble des postes de travaux mais sans inscription dans une trajectoire de performance et **54 % ont été rénovés seulement en partie**. En moyenne, 200 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 74 000 permettant d'atteindre le niveau BBC ou plus (passif). Le rythme reste stable sur l'ensemble de la période.

TERTIAIRE

Dans ce scénario, le parc tertiaire croît pour atteindre **1 133 millions de m² de surfaces chauffées en 2050,**

16 Indicateur de mesure de l'efficacité énergétique d'un data center. Il est calculé en divisant le total de l'énergie consommée par le data center par le total de l'énergie utilisée par les équipements informatiques (serveur, stockage, réseau).

dont un quart sont des bâtiments construits après 2015. Les établissements de santé représentent 22 % des surfaces construites entre 2015 et 2050, suivis par les établissements de « sports, loisirs et culture » (20 %) et l'« habitat communautaire » (14 %).

La surface tertiaire représente en 2050 un ratio de **16 m² par habitant** (contre 15 m² en 2015), actant la poursuite de gains d'espace dans le secteur tertiaire.

5.1.4. Consommation d'énergie

CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE

La consommation d'énergie dans l'industrie (imports inclus, exports exclus) liée à la fabrication de produits de construction et d'équipements pour répondre aux besoins de la construction neuve baisse de 52 TWhEF en 2014 à **32 TWhEF en 2050**, sous l'effet de l'efficacité énergétique et du ralentissement structurel de la construction neuve (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). La production d'acier est le premier poste de consommations (36 %).

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR LES CHANTIERS

La consommation d'énergie pour les chantiers baisse de façon continue et très importante. En 2050, elle représente un peu plus de la moitié des consommations de 2015 (- 45 % entre 2015 et 2050), passant de 11 TWhEF en 2015 à **6 TWhEF en 2050**. Cela s'explique par des gains en efficacité énergétique sur les chantiers (liés notamment à de meilleures pratiques de conception rendues possibles par la maquette numérique) qui se combinent au ralentissement structurel de la construction neuve.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS

RÉSIDENTIEL

Le parc de logements consomme au total **349 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**, dont 284 TWhEF$_{PCI}$ pour la consommation des résidences principales (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement). La consommation d'énergie du résidentiel (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement) baisse de 35 % par rapport à 2015. Le chauffage y est l'usage prépondérant et il repose sur le recours au réseau de gaz, puis à l'électricité et au bois. Il est suivi par les équipements blancs et bruns, dont la consommation s'élève à 1,4 MWh/logement en 2050 (contre 1,9 en 2015). La consommation d'énergie liée à la climatisation augmente fortement.

La consommation de l'ensemble des vecteurs est orientée à la baisse par rapport à 2015, à l'exception des consommations des réseaux urbains et du solaire thermique. La consommation d'électricité reste stable.

Tableau 8 Scénario tendanciel – consommation du résidentiel en 2050 (TWhEF$_{PCI}$)

Résidences principales				Résidences secondaires et logements vacants	Total résidentiel	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
284	53	1	338	9	347	2	349

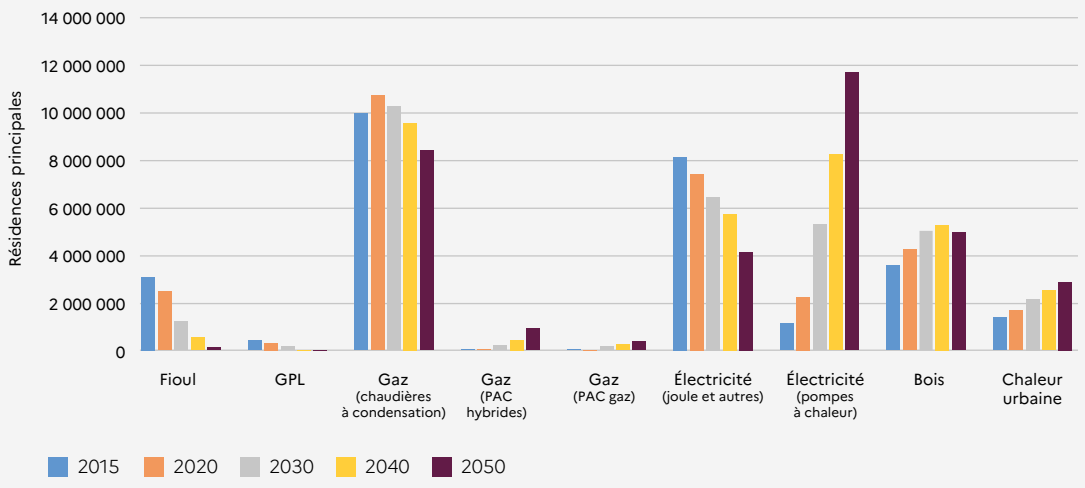
Tableau 9 Scénario tendanciel – consommation énergétique par usage dans les résidences principales (TWhEF$_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	300	270	226	195	167
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	48	4	36	31	29
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	12	30	44	54
Équipements (électricité spécifique et cuisson)	70	68	67	68	68
Éclairage	8	3	3	3	3
Climatisation	2	4	6	8	9
Ventilation	6	6	7	7	7
Auxiliaires	1	1	1	1	1
TOTAL	**442**	**408**	**375**	**357**	**338**

Tableau 10 Scénario tendanciel – consommation énergétique par vecteur dans les résidences principales (TWhEF$_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Chaleur urbaine	16	17	19	19	19	+ 16 %
Réseau de gaz	140	130	113	98	84	- 40 %
Fioul domestique	53	40	15	6	2	- 95 %
Bois	77	69	59	50	41	- 47 %
Électricité (dont consommation des PAC)	142	135	137	138	137	- 3 %
GPL	7	5	2	1	1	- 92 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**436**	**396**	**346**	**313**	**284**	**- 35 %**
Solaire thermique	1	1	1	1	1	+ 21 %
Chaleur EnR puisée par les PAC	5	11	29	43	53	+ 862 %
TOTAL	**442**	**408**	**375**	**357**	**338**	**- 23 %**

Graphique 1 Scénario tendanciel – nombre de résidences principales par équipement de chauffage



TERTIAIRE

La consommation d'énergie du secteur tertiaire s'établit à **266 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**. Ce chiffre recouvre des évolutions contrastées :

- **une baisse de la consommation des branches CEREN** (- 19 % entre 2015 et 2050 pour les consommations hors chaleur EnR), qui traduit principalement la rénovation énergétique du bâti et l'arrivée dans le parc de bâtiments neufs moins consommateurs ;
- **une augmentation de la consommation des secteurs hors CEREN**, qui s'explique par la forte augmentation de la consommation des data centers, qui passe de 2 TWhEF en 2015 à 32 TWhEF en 2050 (l'augmentation du volume de données n'est pas compensée par les progrès de l'efficacité énergétique). Cette hausse de la consommation des secteurs hors CEREN vient contrebalancer les gains des branches CEREN.

L'analyse de la consommation des branches CEREN montre **une baisse des consommations liées au chauffage, mais une augmentation importante des consommations de climatisation**, qui passent de 19 TWhEF en 2015 à 27 TWhEF en 2050. Au final, la consommation unitaire moyenne de ces branches s'établit à 160 KWhEF$_{PCI}$/m² (surface chauffée) en 2050 (contre 231 en 2015).

Le mix énergétique du chauffage et de l'eau chaude sanitaire reste dominé par le **gaz** (48 %), suivi de l'électricité (28 %). Le fioul domestique est encore présent en 2050 mais de manière résiduelle.

Tableau 11 Scénario tendanciel – consommation du tertiaire en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Secteurs CEREN				Secteurs hors CEREN	Total tertiaire	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
181	26	1	208	54	263	3	266

Tableau 12 Scénario tendanciel – évolution de la consommation énergétique par usage dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	102	98	78	69	62
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	21	22	22	22	22
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	8	22	26	27
Autres usages thermiques	11	11	11	10	9
Équipements (électricité spécifique et éclairage)	59	60	56	53	50
Cuisson	11	11	10	10	9
Climatisation	19	13	15	19	27
TOTAL branches CEREN	**229**	**224**	**214**	**209**	**208**
Hors CEREN	**31**	**31**	**29**	**36**	**54**
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**243**	**246**	**263**

Tableau 13 Scénario tendanciel – évolution de la consommation d'énergie par vecteur dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Secteurs CEREN						
Chaleur urbaine	9	9	9	10	11	+ 19 %
Réseau de gaz	71	69	59	53	48	- 32 %
Fioul domestique	28	25	14	9	5	- 82 %
Bois	1	2	2	2	2	+ 58 %
Électricité (dont consommation des PAC)	109	107	104	107	112	+ 3 %
GPL	4	4	3	2	2	- 58 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**222**	**216**	**192**	**183**	**181**	**- 19 %**
Solaire thermique	0	0	0	0	1	+ 693 %
Chaleur EnR puisée par les PAC	6	8	21	26	26	+ 357 %
TOTAL secteurs CEREN	**228**	**224**	**214**	**209**	**208**	**- 9 %**
Secteurs hors CEREN (électricité)	31	31	29	36	54	+ 73 %
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**243**	**246**	**263**	**+ 1 %**

5.1.5. Émissions de GES

ÉMISSIONS DE GES POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS[17]

Dans le scénario tendanciel, les émissions de GES liées à la combustion d'énergie fossile dans le bâtiment (scope 1) passent de 70 $MtCO_2eq$ en 2015 à **26 $MtCO_2eq$ en 2050**. L'évolution à la baisse du contenu carbone des réseaux permet également d'obtenir une baisse des émissions liées à la production d'électricité et réseaux de chaleur alimentant les bâtiments, qui s'établissent à 4 $MtCO_2eq$ en 2050.

STOCKAGE DE CO_2 DANS LES PRODUITS BOIS

Dans le scénario tendanciel, il est estimé que le stockage de CO_2 dans les produits bois de construction s'élève à **3,2 $MtCO_2$/an en 2050** (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

5.1.6. Production de déchets liée à l'activité du bâtiment

Les déchets du bâtiment s'orientent légèrement à la baisse du fait du ralentissement structurel de la construction neuve. Ils passent de 42 Mt en 2015 à 39 Mt en 2050. Le réemploi se développe pour atteindre 3,9 Mt en 2050, soit 10 % du volume de déchets généré par le bâtiment (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets* pour la méthodologie de chiffrage).

5.2. Scénario 1 : limitation de la construction, rénovation rapide et modification d'ampleur des modes de vie

5.2.1. Philosophie globale

L'enjeu de ce scénario est de réussir rapidement à **faire évoluer les modes de vie**. Il implique un alignement de la société sur la contrainte environnementale dans des délais très courts. C'est le scénario qui fait la part la plus importante à la **sobriété**, afin de réduire au minimum la pression de la société sur l'environnement.

À l'échelle du parc, **c'est le scénario dans lequel on construit le moins**. Dans un contexte de rééquilibrage territorial, les logements vacants et les résidences secondaires sont transformés en résidences principales. Les changements d'usage (transformation de bureaux en logements, etc.) permettent de réutiliser le bâti existant. L'intensité d'usage des locaux augmente : les bureaux inoccupés le soir accueillent des activités, la mutualisation des espaces s'accentue… Les bâtiments construits sont conçus pour être réversibles. La construction neuve ralentit donc très fortement, pour atteindre un quasi-arrêt de la construction de logements en 2050. En conséquence, la consommation d'énergie dans l'industrie liée à la demande du secteur bâtiment diminue fortement.

La surface par personne diminue. D'un côté, le réinvestissement de logements augmente le taux d'occupation global du parc. De l'autre, ce scénario est celui où le nombre de personnes par ménage est le plus élevé, les personnes âgées vivant moins souvent seules. Le ratio de surface tertiaire par habitant baisse pour revenir à son niveau du début des années 1990 (soit 12 m² par habitant). L'habitat communautaire est la seule branche qui se développe, en réponse au vieillissement de la population. **L'immobilier tertiaire connaît des évolutions d'ampleur**, conséquence de l'évolution des modes de vie. L'énergie devient un critère de choix des pratiques de loisirs, l'image du voyage change…

À l'échelle du bâtiment, ce scénario projette une **rénovation d'une ampleur inégalée, à la fois dans son rythme, son ambition énergétique et la proportion du parc concerné**. Alors qu'en 2015 moins de 1 % des logements existants sont labéllisés BBC Rénovation en France [36], l'ensemble des logements non démolis d'ici 2050 sont rénovés (soit 22 millions), dont 79 % à un niveau BBC ou plus. Ces rénovations se font en majorité *via* **des rénovations BBC en une fois**, pour assurer l'atteinte des objectifs. Dans le tertiaire, **les bâtiments de moins de 1 000 m², non assujettis au Dispositif Éco Énergie tertiaire, engagent des travaux également**. En 2050, 80 % des locaux tertiaires existants en 2015 (soit 561 millions m² chauffés) sont rénovés à hauteur des objectifs du Dispositif[18]. Les bâtiments neufs font également l'objet d'une amélioration rapide de leur performance. La réglementation évolue avec l'obligation de résultat sur les consommations d'énergie ou émissions carbone réelles (et non conventionnelles) calculée par personne (et non au m² comme par le passé). Conséquence de cette dynamique de rénovation : la consommation énergétique liée aux chantiers s'oriente à la hausse entre 2015 et 2040.

La sobriété s'exprime également par une moindre possession d'équipements et une utilisation moins intense. Au-delà des appareils de base assurant le

17 À la date de publication de ce rapport, les évaluations GES réalisées dans ce chapitre sectoriel n'ont pas pu prendre en compte les derniers bouclages concernant les facteurs d'émissions des vecteurs gaz et électricité, en raison des interactions entre ces vecteurs. Ces modifications seraient de second ordre et ne modifient pas les grandes conclusions de ce chapitre.

18 Réduction de 60 % des consommations d'énergie finale par rapport à 2010.

confort, l'achat d'appareils électroniques moins indispensables est fortement découragé. **Le nouvel enjeu énergétique que représente le confort d'été est géré dans une optique de sobriété** : si le taux d'équipement en climatisation augmente, les occupants n'y ont recours que dans les périodes de canicule et avec une température de consigne élevée (26 °C), lorsque les autres stratégies (surventilation de nuit, protections solaires…) ne sont plus suffisantes.

Le levier de l'efficacité est exploré dans ce scénario, mais il ne s'y exprime pas à son plein potentiel. L'efficacité de certains équipements (par exemple l'électroménager) y progresse moins que dans des scénarios plus « technologiques » (S3 et S4). En effet, dans un contexte où les ventes d'appareils neufs baissent (au profit de la réparation et de la seconde main), l'incitation à la recherche et développement est moins marquée.

Ce scénario utilise des énergies peu carbonées facilement et rapidement mobilisables. Le changement d'énergie s'accélère sous l'effet de la rénovation. **Le fioul disparaît du bâti existant dès 2030**, la part du gaz de réseau baisse. Même si les pompes à chaleur dominent dans les logements en 2050 (39 % du parc), c'est **le scénario qui compte le plus grand nombre de logements utilisant le bois comme énergie de chauffage** (près de 12 millions de logements, soit 38 % du parc) **et le moins de logements chauffés au gaz réseau** (environ 3 millions, soit 9 % du parc). Dans le tertiaire, les bâtiments sortent du fioul en 2030 et la part du gaz de réseau baisse au profit des réseaux de chaleur et de l'électricité (pompes à chaleur) (*cf.* chapitres *2.3.1. Mix gaz* et *2.3.2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux*). Le photovoltaïque en toiture se développe fortement du fait de la baisse des coûts qui améliore la rentabilité de l'autoconsommation, elle-même encouragée par le développement des véhicules électriques. La réappropriation de l'énergie par les citoyens contribue à un développement plus marqué sur petite toiture. Le solaire thermique reste à son niveau actuel (principalement pour l'eau chaude sanitaire dans le collectif).

Les systèmes constructifs bas carbone et les matériaux biosourcés se développent fortement. Les isolants biosourcés représentent par exemple 60 % du volume d'isolants utilisés entre 2015 et 2050 pour la rénovation énergétique des logements. Les modes constructifs bois prennent une part très importante (de 40 à 50 % selon le type de bâtiment et d'usage). Les déchets du bâtiment s'orientent à la baisse du fait du fort ralentissement de la construction neuve.

Les stratégies d'adaptation au changement climatique utilisent au maximum des solutions *low tech* (brasseurs d'air, végétalisation, logements traversants dans le neuf…). L'anticipation du risque climatique est précoce et s'inscrit rapidement dans les politiques de rénovation.

5.2.2. Hypothèses

Les principales hypothèses pour les logements sont présentées dans le *Tableau 14*.

Tableau 14 Scénario 1 – narratif

Ensemble des bâtiments	
Réglementation environnementale des bâtiments neufs	La réglementation est axée sur le besoin d'assurer rapidement la frugalité des bâtiments neufs, autant dans leur consommation énergétique que dans leurs modes constructifs. Elle permet une adaptation aux spécificités locales (obligation d'utiliser les ressources et les énergies locales…). Introduction de quotas de consommation, d'une obligation de résultat sur les consommations d'énergie/émissions carbone réelles (*vs* conventionnelles) calculée à la personne (et non au m² comme par le passé), pour assurer la frugalité dans la conception et les usages. Accent fort mis sur le bioclimatisme à l'échelle du bâtiment ainsi que du quartier. Le bâtiment devient un support aux pratiques sobres (buanderies collectives…).
Modes constructifs	• **Matériaux**. Les modes constructifs bois prennent une part très importante, et le recours aux matériaux biosourcés s'accélère. L'usage de matériaux locaux intègre également le développement de matériaux géosourcés, mais à un niveau faible. L'industrie des matériaux traditionnels se transforme pour décarboner sa production. Développement d'une offre de super-isolation pour la rénovation (*cf.* chapitres *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* et *2.4.3. Puits de carbone*). • **Techniques de mise en œuvre**. Pour le neuf comme pour la rénovation, les solutions de mise en œuvre restent traditionnelles (pénétration de la préfabrication comme pour le scénario tendanciel). Développement du réemploi pour les produits et matériaux de construction. Pour la rénovation/réhabilitation, développement de solutions de construction et d'aménagement modulaires/modulables pour permettre l'évolutivité et la transformation des bâtiments. • **Gestion des chantiers**. L'efficacité énergétique des chantiers s'améliore lentement, notamment grâce à de meilleures pratiques de conception rendues possibles par la maquette numérique. Celle des rénovations augmente, grâce un effet d'apprentissage. Le réemploi des produits et matériaux de construction se développe.
Adaptation au changement climatique	Les stratégies d'adaptation au changement climatique utilisent au maximum des solutions *low tech* (brasseurs d'air, végétalisation, logements traversants dans le neuf…). L'anticipation du risque climatique est précoce et s'inscrit rapidement dans les politiques de rénovation (*cf.* chapitre *1.3. Adaptation au changement climatique*).

Suite page suivante

Résidentiel	
Logements neufs	• **Volume de construction de logements neufs**. Le nombre de logements construits annuellement baisse significativement. Le besoin en logement baisse, du fait à la fois du ralentissement de la croissance démographique et de pratiques de cohabitation des personnes âgées. Les besoins créés par l'augmentation de la population sont absorbés principalement par optimisation du parc de bâtiments existants (transformation de résidences secondaires en principales, résorption de la vacance). Les résidences secondaires sont mutualisées. • **Typologie des logements neufs**. La part des maisons individuelles recule drastiquement au profit de petits collectifs ou d'habitat dense individualisé. • **Qualité thermique**. Les performances énergétiques des logements affichent une amélioration rapide. Dès la décennie 2020-2030, les logements construits sont au moins à un niveau BEPAS ou BEPAS+. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Le fioul et le gaz disparaissent, développement des chauffe-eau thermodynamiques. Le solaire thermique reste à son niveau actuel (principalement pour l'eau chaude sanitaire dans le collectif). • **Équipements et énergie de chauffage**. Le gaz est remplacé par une diversité d'EnR (bois, pompes à chaleur) • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. L'application des principes de bioclimatisme dans les constructions neuves permet de diminuer le besoin de climatisation. Le taux d'équipement augmente cependant *via* les pompes à chaleur réversibles.
Logements existants	• **Politique de rénovation énergétique des logements**. L'urgence climatique et la sobriété priment et façonnent une politique de rénovation ambitieuse. Le ciblage de la politique se fait en fonction du niveau de consommation ou d'émissions de GES des logements. La priorité est donnée à la baisse du besoin énergétique des logements. Les rénovations énergétiques performantes (*i.e.* permettant d'atteindre au moins les critères du label BBC Rénovation 2009) deviennent majoritaires. Les rénovations par geste non connectées à une trajectoire de performance disparaissent. Augmentation sans précédent et très rapide du rythme de rénovations performantes des logements, couplé à une sobriété dans les pratiques de chauffage dans les logements en attente de rénovation. En 2050, on arrive à un parc rénové à un haut niveau de performance énergétique. • **Besoins et qualité thermique**. Le besoin de chaud diminue très fortement du fait de la rénovation thermique, d'un dimensionnement au plus juste des systèmes, et de la généralisation, dans les logements non encore rénovés, d'habitudes de sobriété (chauffer seulement quelques pièces, diminuer le nombre de douches…). Ces comportements ne concernent pas que les ménages en précarité énergétique, ils sont aussi mis en place par d'autres groupes sociaux. Le besoin de froid baisse sous l'effet combiné de la rénovation, d'une gestion des îlots de chaleur et de l'utilisation de la climatisation seulement pour les périodes les plus chaudes (le rafraîchissement étant assuré par des gestes de type surventilation nocturne le reste du temps). • **Équipements et énergies de chauffage**. La recherche d'autonomie passe par des énergies facilement mobilisables (bois, etc.) et une grande variété d'EnR. Le changement d'énergie s'accélère, sous l'effet du rythme important de rénovation, qui vient s'ajouter au remplacement des équipements en fin de vie. On utilise les leviers de décarbonation les plus rapidement actionnables : interdiction du fioul, éradiqué dès 2030, sortie du gaz au fur et à mesure des rénovations. Développement du chauffage au bois, des réseaux de chaleur et des pompes à chaleur électriques. Le chauffage au gaz est fait *via* des chaudières à condensation. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Pour les systèmes non combinés, les besoins étant maîtrisés, l'ECS est produite principalement par effet Joule. Les EnR (solaire thermique) contribuent de façon minoritaire à la production d'ECS (maintien au niveau actuel). • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. Le taux de climatisation augmente pour gérer les périodes de canicule, mais tous les logements ne sont pas équipés en 2050. La rénovation a permis le choix de la meilleure technologie pour chaque logement, en cohérence avec le système de chauffage. Les climatiseurs mobiles sont moins utilisés, les PAC se développent. Les climatiseurs monosplits (qui servent à climatiser une seule pièce) restent une solution pour climatiser une seule pièce (dans une logique de sobriété).
Vie quotidienne	• **Volume d'eau chaude sanitaire par personne**. Le volume baisse de 20 % à 2050 (évolution des normes d'hygiène du type douche quotidienne). • **Température de consigne de chauffage**. La température de consigne se réduit d'environ 2 °C, sous l'effet combiné des comportements de restriction (on chauffe seulement certaines pièces, par exemple) et d'un meilleur confort des logements rénovés. • **Produits blancs**. La consommation énergétique entre 2020 et 2040 baisse rapidement grâce à une évolution importante des comportements. Baisse du nombre de cycles (lavage, sèche-linge), baisse drastique du taux d'équipement en petits appareils et en équipements mutualisables (lave-linge, fers à repasser…). Utilisation des réglages les plus efficaces possibles. Choix de l'équipement le plus efficace du marché à l'achat. L'accent est mis sur la réparabilité, l'entretien permet d'allonger la durée de vie et le marché de la seconde main se développe. Augmentation de l'efficacité énergétique des équipements sans évolution technologique majeure. • **Produits bruns et gris**. Les consommations énergétiques des usages numériques baissent de façon importante, les flux de données associés se stabilisent, contraints par le développement de l'infrastructure des réseaux. Les loisirs sont moins numériques. L'usage du numérique (les éventuels objets connectés) s'oriente vers la transition (régulation des bâtiments…), l'inclusion sociale (autonomie des personnes âgées…), le travail à distance ou la télémédecine. La durée de vie des équipements s'allonge. • **Éclairage**. L'effort de sobriété permet de réduire la consommation, malgré les besoins accrus de la population vieillissante : moindre équipement en lampes purement décoratives, aménagement permettant d'accéder à l'éclairage naturel, luminaires moins occultants… Passage au tout LED alimenté par des sources d'énergie renouvelables. La durée de vie des lampes augmente. • **Cuisson**. Les ménages cuisinent plus à domicile, à partir de produits frais et simples et adoptent plus souvent une cuisine crue. Cette hausse des activités de cuisine est contrebalancée par des pratiques de cuisson sobres en énergie et une limitation du multi-équipement. Les comportements sobres (couvercles, cuisson simultanée de plusieurs plats, etc.) se généralisent, ainsi que les réglages favorables aux économies d'énergie (mode « éco » par défaut, veille profonde…). Le multi-équipement en petits appareils de cuisson spécialisés (glacières, robots…) disparaît et la mutualisation (appareils à raclette…) se développe. Les évolutions technologiques sont moins poussées que dans le tendanciel, avec une efficacité qui progresse moins vite (moins d'optimisations avec capteurs, intelligence artificielle, commande à distance, etc.). L'électrification de la cuisson s'accélère.

Suite page suivante

Tertiaire	
Bureaux	Dans un contexte où l'entreprise comme lieu physique perd de sa centralité, et où le nomadisme se développe, on constate une régression des surfaces de bureaux, qui sont distribuées sur le territoire et qui se mettent à son service en devenant multifonctionnelles. Leur intensité d'usage augmente : lors des périodes d'inoccupation, les locaux sont utilisés pour d'autres activités (sportives, culturelles, associatives). Dans une logique de sobriété, le niveau de service des bureaux n'augmente pas (pas de conciergerie, de services à la personne…). La gestion de l'obsolescence se fait par la rénovation, mais aussi l'adaptation et le changement d'usage. Une partie non négligeable des anciens espaces de bureaux change d'usage, au gré des besoins des territoires (logement, enseignement, santé…).
Cafés-hôtels-restaurants	Un tourisme totalement réorienté par la prise en compte de ses impacts environnementaux et les premiers effets du changement climatique. L'image du voyage évolue : l'aventure se passe au coin de la rue. Le tourisme pour vacances/loisirs évolue : les courts voyages de type *city breaks* sont remplacés par des micro-aventures près de chez soi (*staycation*, dépaysement de proximité). Développement des modes actifs (cyclotourisme et marche). Le tourisme d'affaires se réduit. Les voyageurs cherchent avant tout des hébergements simples, sans services associés (piscine, salle de sport…). Les restaurants s'engagent dans la transition écologique et étendent la palette de leur offre (bistro rural multiservices, cantines pour personnes âgées…) sur tout le territoire. Les cartes deviennent plus simples et plus orientées vers des produits locaux/des plats du jour.
Commerces	La place de la consommation de biens se réduit : au vieillissement de la population s'ajoute une évolution des comportements (réparation, baisse du nombre d'objets possédés). Le commerce opère une grande mue : les commerces investissent les quartiers résidentiels et réinvestissent les centre-villes. On assiste au développement d'un maillage serré de petits commerces multithématiques alliant vente et réemploi/réparation (couture, électroménager…), moins spécialisés que par le passé mais plus proches de chez soi. Le numérique et le e-commerce permettent d'optimiser le réemploi.
Enseignement-recherche	Les établissements d'enseignement sont moins spacieux. Ils ouvrent leurs portes aux autres usages le soir et le week-end (sports, loisirs, cantine…).
Santé	Les besoins en bâtiments de santé suivent les évolutions démographiques, avec toutefois une attention à limiter la surface par personne. La numérisation des établissements de santé se poursuit. Les établissements ne développent pas de nouveaux services (magasins, restaurants…). La gestion de l'obsolescence se fait en priorité *via* la rénovation ou le changement d'usage.
Habitat communautaire	L'habitat communautaire se développe pour répondre principalement aux besoins liés au vieillissement de la population. Cet habitat accueille en majorité des personnes âgées en situation de dépendance, les personnes non dépendantes restant plus souvent dans le parc résidentiel (colocation intergénérationnelle et maintien à domicile pour les plus âgés, logement abordable pour les personnes en difficulté sociale…). Les services offerts permettent de diminuer les consommations d'énergie (mutualisation des équipements…).
Sports, loisirs, culture	Les activités du temps libre évoluent. La prise de conscience de l'impact environnemental de certaines pratiques et l'organisation du secteur pour proposer des alternatives séduisantes aux formes de loisirs les plus énergivores permettent une transition vers des pratiques culturelles moins consommatrices d'énergie. Les activités de plein air, des événements culturels et des micro-aventures locales se développent. Lorsqu'elles se déroulent en intérieur, ces activités prennent place dans des bâtiments multifonctionnels, conçus pour pouvoir héberger une multitude d'activité (concert, expo…). Les équipements sportifs énergivores (ex. : patinoires) baissent. Les salles de sports publiques et privées deviennent sobres avec des équipements *low tech* et robustes. Le rééquilibrage territorial des lieux de vie conduit à une réaffection de certains logements en lieux culturels ou sportifs (par exemple : une maison d'un lotissement pavillonnaire transformée en lieu de sociabilité).
Data centers	Diminution de la consommation énergétique : l'arrêt de la croissance du volume de données dès 2025 se combine à des gains d'efficacité énergétique. Pas de développement des data centers : suffisamment de limitation des appareils pour que l'intelligence soit embarquée (pas besoin de la loger dans des data centers). Prise de conscience de l'impact environnemental du cloud avec une vraie sobriété numérique. • **Volume de données**. La croissance de volume de données des petits data centers (5G, Internet des objets…) reste tendancielle jusqu'à 2023. À partir de 2024, elle diminue par palier de 10 % tous les 2 ans pour devenir nulle à partir de 2032. Le volume de données des gros data centers (hyperscale, gros hébergeurs…) en 2020 est de 107,65 EB. Il croît de 15 % par an jusqu'en 2050 de façon identique au scénario tendanciel. • **Type de data centers**. Les data centers se développent peu : il y a suffisamment de limitation des appareils pour que l'intelligence soit embarquée. • **Efficacité énergétique de la partie informatique**. L'efficacité de traitement des données des petits data centers et des gros augmente de 13 % par an jusqu'en 2050. • ***Power Usage Effectiveness* (PUE)**. Le PUE des petits data centers est de 2,10 en 2020 et diminue de 2 % tous les ans (= 1,15 en 2050). Le PUE des gros data centers est de 1,80 en 2020 et diminue de 2 % par an tous les ans pour atteindre le palier de 1,02 à partir de 2048.

5.2.3. Dynamique du parc à 2050

RÉSIDENTIEL

En 2050, le parc de logements est constitué de 32 millions de résidences principales (dont d'anciennes résidences secondaires et logements vacants), auxquelles viennent s'ajouter 3 millions de résidences secondaires et logements vacants. **Au bilan, 12 % du parc de résidences principales (soit 4 millions de logements) a été construit après 2015**. En moyenne, 111 000 logements sont construits par an entre 2015 et 2050. **Le rythme de construction décroît très fortement pour devenir résiduel** (moins de 2 000 logements neufs construits en moyenne par an sur la période 2040-2050). Environ 64 000 logements sont détruits par an en moyenne.

L'ensemble des logements existants en 2015 et non démolis ont fait l'objet d'une rénovation énergétique plus ou moins marquée. **Au final, 79 % ont été rénovés à un niveau BBC Rénovation ou plus**, 14 % ont fait l'objet d'une rénovation touchant l'ensemble des postes de travaux mais sans inscription dans une trajectoire de performance et 7 % ont été rénovés seulement en partie. En moyenne, 625 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 531 000 permettant d'atteindre le niveau BBC ou plus (passif). **La rénovation accélère très fortement sur la période 2020-2040** : elle concerne alors entre 800 000 et 900 000 logements par an, qui font l'objet à la fois d'une rénovation complète de leur enveloppe et d'un changement de leurs équipements de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Puis, la majeure partie du parc ayant été rénovée, la dynamique décroît sur la dernière décennie pour se stabiliser autour de 330 000 rénovations complètes par an.

TERTIAIRE

Dans ce scénario, **le parc tertiaire décroît pour atteindre 832 millions de m²** de surfaces chauffées en 2050, dont 16 % sont des bâtiments construits après 2015. Les établissements d'habitat communautaire représentent 28 % des surfaces construites entre 2015 et 2050, suivis par les bureaux (20 %) et l'enseignement-recherche (19 %).

La surface tertiaire représente en 2050 un ratio de **12 m² par habitant** (contre 15 m² en 2015), ce qui traduit l'attention apportée à l'optimisation du parc existant.

5.2.4. Consommation d'énergie

CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE

La consommation d'énergie finale liée à la demande du secteur du bâtiment (imports inclus, exports exclus) décroît fortement. Elle passe de 52 TWhEF en 2014 à **14 TWhEF en 2050**. La production d'acier est le premier poste de consommation (38 %) (*cf.* chapitre *2.2.3 Production industrielle*).

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR LES CHANTIERS

La consommation d'énergie pour les chantiers s'oriente dans un premier temps à la hausse : de 11 TWhEF en 2015, elle passe à 18 TWhEF en 2030 puis 19 TWhEF en 2040. La forte baisse de la construction neuve entraîne une baisse drastique de la consommation associée. Mais l'augmentation significative de la rénovation contribue de façon importante aux consommations de chantier et ce, malgré une légère amélioration de l'efficacité énergétique par rapport au scénario tendanciel, liée à de meilleures pratiques de conception (maquette numérique) et de gestion de l'énergie sur les chantiers, notamment de rénovation. Elle baisse ensuite de façon importante, jusqu'à **7 TWhEF en 2050**, sous l'effet du ralentissement des rénovations.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS

RÉSIDENTIEL

Le parc de logements consomme au total **228 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**, dont 181 TWhEF$_{PCI}$ pour la consommation des résidences principales (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement). La consommation d'énergie du résidentiel (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement) baisse de 58 % par rapport à 2015. Le chauffage y est l'usage prépondérant et il repose sur le recours au gaz, puis à l'électricité et au bois. En effet, près de 2,6 millions de logements collectifs sont chauffés au bois en 2050 (contre 260 000 en 2015) et le nombre de maisons individuelles chauffées au bois triple d'ici 2050. Il est suivi des équipements blancs et bruns, dont la consommation s'élève à 0,7 MWh/logement en 2050 (contre 1,9 en 2015). La consommation d'énergie liée à l'éclairage et la climatisation baisse.

La consommation de l'ensemble des vecteurs est orientée à la baisse par rapport à 2015, à l'exception des consommations des réseaux urbains et du solaire thermique.

Tableau 15 Scénario 1 – consommation du résidentiel en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Résidences principales				Résidences secondaires et logements vacants	Total résidentiel	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
181	43	1	227	2	228	0	228

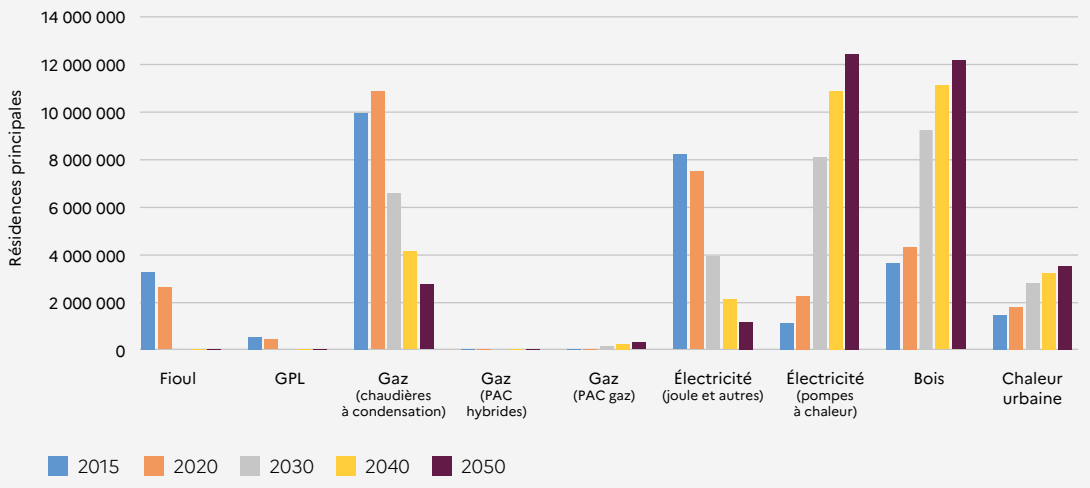
Tableau 16 Scénario 1 – consommation énergétique par usage dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	300	270	169	121	110
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	48	43	30	28	27
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	12	35	39	44
Équipements	70	68	50	40	34
Éclairage	8	3	2	2	1
Climatisation	2	4	1	1	1
Ventilation	6	6	7	6	6
Auxiliaires	1	1	1	1	1
TOTAL	**442**	**407**	**294**	**238**	**225**

Tableau 17 Scénario 1 – consommation énergétique par vecteur dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Chaleur urbaine	16	17	22	19	18	+ 9 %
Réseau de gaz	140	130	59	31	20	- 85 %
Fioul domestique	53	39	0	0	0	- 100 %
Bois	77	69	72	62	65	- 16 %
Électricité dont consommation des PAC)	142	135	105	87	78	- 45 %
GPL	7	5	0	0	0	- 94 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**436**	**395**	**259**	**200**	**181**	**- 58 %**
Solaire thermique	1	1	1	1	1	+ 21 %
Chaleur EnR puisée par les PAC	5	11	33	37	43	+ 683 %
TOTAL	**442**	**407**	**294**	**238**	**225**	**- 49 %**

Graphique 2 Scénario 1 – nombre de résidences principales par équipement de chauffage



TERTIAIRE

La consommation d'énergie du secteur tertiaire s'établit à **146 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**. Ce chiffre recouvre les évolutions combinées :

- **des branches CEREN, dont la consommation baisse de 57 %** (95 TWhEF$_{PCI}$ en 2050) sous l'influence combinée de la rénovation énergétique, de l'adoption d'équipements de chauffage plus efficaces (pompes à chaleur notamment) et de la baisse globale de surface. En 2050, 80 % du parc existant en 2015 est rénové à un niveau correspondant aux exigences du Dispositif Éco Énergie Tertiaire[19], soit 561 millions m² (surfaces chauffées) ;
- d'une **baisse des consommations des secteurs hors CEREN** et notamment des data centers, dont la consommation baisse à partir de 2027 pour atteindre 0,8 TWh en 2050 (contre 2 TWh en 2015).

L'analyse de la consommation des branches CEREN montre **une baisse importante des consommations sur l'ensemble des usages**. Cette réduction concerne également la climatisation et ce, en dépit d'une augmentation des surfaces climatisées, grâce à l'ajustement des températures de consigne. Au final, la consommation unitaire moyenne de ces branches s'établit à **116 KWhEF$_{PCI}$/m²** (surfaces chauffées) en 2050 (contre 231 en 2015).

Le mix énergétique du chauffage et de l'eau chaude sanitaire s'électrifie par le recours à des pompes à chaleur (dont les pompes à chaleur géothermiques permettant de couvrir les besoins de chaud et de froid). L'électricité représente 59 % des consommations en 2050. Les produits pétroliers disparaissent. Les réseaux de chaleur fournissent 19 % des consommations.

19 Réduction de 60 % des consommations d'énergie finale par rapport à 2010.

Tableau 18 Scénario 1 – consommation du tertiaire en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Secteurs CEREN				Secteurs hors CEREN	Total tertiaire	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
95	28	1	124	22	146	0	146

Tableau 19 Scénario 1 – évolution de la consommation énergétique par usage dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	102	98	57	42	31
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	21	22	16	12	9
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	8	26	31	29
Autres usages thermiques	11	11	8	7	6
Équipements (électricité spécifique et éclairage)	59	60	49	42	36
Cuisson	11	11	9	8	7
Climatisation	19	13	6	5	5
TOTAL branches CEREN	**229**	**224**	**172**	**147**	**124**
Hors CEREN	**31**	**31**	**27**	**25**	**22**
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**199**	**172**	**146**

Tableau 20 Scénario 1 – évolution de la consommation d'énergie par vecteur dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Secteurs CEREN						
Chaleur urbaine	9	9	8	8	8	- 14 %
Réseau de gaz	71	69	38	21	9	- 87 %
Fioul domestique	28	25	2	0	0	- 100 %
Bois	1	2	2	2	2	38 %
Électricité (dont consommation des PAC)	109	107	94	84	75	- 31 %
GPL	4	4	2	1	0	- 88 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**222**	**216**	**146**	**116**	**95**	**- 57 %**
Solaire thermique	0	0	1	1	1	
Chaleur EnR puisée par les PAC	6	8	25	30	28	383 %
TOTAL secteurs CEREN	**228**	**224**	**172**	**147**	**124**	**- 46 %**
Secteurs hors CEREN (électricité)	31	31	27	25	22	- 30 %
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**199**	**172**	**146**	**- 44 %**

5.2.5. Émissions de GES

ÉMISSIONS DE GES POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS[20]

Les émissions de GES liées à la combustion d'énergie fossile dans le bâtiment (scope 1) deviennent résiduelles, puisqu'elles passent de 70 $MtCO_2eq$ en 2015 à **1,4 $MtCO_2eq$ en 2050**. L'évolution à la baisse du contenu carbone des réseaux permet également d'obtenir une baisse des émissions liées à la production d'électricité et réseaux de chaleur alimentant les bâtiments, qui s'établissent à 1,9 $MtCO_2eq$ en 2050.

STOCKAGE DE CO_2 DANS LES MATÉRIAUX

Le stockage de CO_2 dans les matériaux de construction s'élève à **4,2 $MtCO_2$/an en 2050** (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

5.2.6. Consommation de ressources

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION NEUVE

La consommation de matériaux pour la construction neuve s'élève, en cumulé entre 2015 et 2050, à :

- 522 Mt pour la construction de logements neufs (EHPAD inclus);
- 122 Mt pour les bâtiments tertiaires de grandes surfaces commerciales, d'hôtel, d'enseignement et de bureau.

Ce sont les granulats qui représentent le volume le plus important (42 %), suivis par le sable (33 %) et le ciment (10 %) (*cf.* *Tableau 46* pour le détail des matériaux consommés). **Le tonnage d'isolants biosourcés (dont les fibres et laines de bois) baisse fortement.** Du fait du ralentissement de la construction de logements, on observe une division par douze des consommations entre 2015 et 2050 (avec une très forte réduction pour le secteur résidentiel). Leur consommation est évaluée à 636 kt en cumulé sur la période 2015-2050, soit environ 17 % du total des consommations d'isolants.

Ce volume cumulé traduit :

- une baisse très forte de la consommation de matériaux pour le résidentiel, qui devient résiduelle en 2050 (400 kt pour l'année 2050 contre 43 000 kt en 2015);
- une division par quatre des consommations pour le tertiaire (grandes surfaces commerciales, hôtel, enseignement et bureau) entre 2015 et 2050 (2 000 kt pour l'année 2050 contre 8 000 kt en 2015).

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la construction de l'ensemble des bâtiments** (résidentiels, tertiaires, industriels et de stockage, agricoles) **baisse de 24 % par rapport à 2015** et ce malgré des parts de modes constructifs bois (*Cross Laminated Timber*, ossature bois, poteaux-poutres et systèmes mixtes) comprises entre 40 % et 50 % suivant le type de bâtiment ou d'usage. Cette réduction importante s'explique par la baisse de la construction. La consommation de bois évolue ainsi de 1,7 Mm^3 en 2015 à 1,15 Mm^3 en 2035 (50 % feuillus, 50 % résineux) et **1,35 Mm^3 en 2050** (60 % feuillus, 40 % résineux) (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* pour les ressources disponibles pour chaque scénario).

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA RÉNOVATION

Les travaux relatifs à la rénovation énergétique BBC des logements construits après 2012 (donc non soumis à la RT 2012) **requièrent, en cumulé entre 2015 et 2050, 74 Mt de matériaux** (*cf.* *Tableau 47* pour le détail des matériaux). Les isolants biosourcés représentent 60 % des quantités d'isolants utilisés entre 2015 et 2050 (soit 10,8 Mt).

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la rénovation** (énergétique et non énergétique) **de l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires augmente** : elle passe de 2,5 Mm^3 en 2015 à 3,7 Mm^3 en 2035 (30 % feuillus, 70 % résineux) et **4,6 Mm^3 en 2050** (40 % feuillus, 60 % résineux). Pour les bâtiments industriels, de stockage et agricoles, cette consommation est considérée comme négligeable.

PRODUCTION DE DÉCHETS LIÉE À L'ACTIVITÉ DU BÂTIMENT

Les déchets du bâtiment s'orientent à la baisse du fait du fort ralentissement de la construction neuve. Ils passent de 42 Mt en 2015 à **37 Mt en 2050**. Le réemploi se développe pour atteindre 3,7 Mt en 2050, soit 10 % du volume de déchets généré par le bâtiment (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets* pour la méthodologie de chiffrage).

Les déchets liés à la rénovation BBC des logements constituent une fraction des déchets du bâtiment. En cumulé sur la période 2015-2050, ils représentent 15,9 Mt pour les matériaux retirés et les chutes de

20 À la date de publication de ce rapport, les évaluations GES réalisées dans ce chapitre sectoriel n'ont pas pu prendre en compte les derniers bouclages concernant les facteurs d'émissions des vecteurs gaz et électricité, en raison des interactions entre ces vecteurs. Ces modifications seraient de second ordre et ne modifient pas les grandes conclusions de ce chapitre.

mise en œuvre (*cf.* ***Tableau 50*** pour le détail des matériaux). La rénovation entraîne la dépose de 180 Mt (bois et PVC) (*cf.* ***Tableau 51*** pour le détail des éléments déposés).

5.3. Scénario 2 : rénovation massive, évolutions graduelles mais profondes des modes de vie

5.3.1. Philosophie globale

Le défi que représente ce scénario est celui de **l'évolution d'ampleur de nos modes de vie à un rythme permettant d'embarquer l'ensemble de la société.** Il présente des évolutions moins rapides que S1 et pousse un peu moins loin le curseur de la sobriété. Les autres leviers sont actionnés dans le même esprit.

Ce scénario implique également des **évolutions très fortes par rapport au tendanciel**. À l'échelle du parc bâti, il intègre une **baisse importante de la construction neuve dans un contexte de rééquilibrage territorial**, sous l'effet combiné du réinvestissement des logements vacants et des résidences secondaires, de l'augmentation de l'intensité d'usage du bâti et du changement d'usage de bâtiments tertiaires vers le logement. Bureaux et écoles ouvrent leurs portes le soir à d'autres activités, limitant le besoin en locaux de loisirs, qui eux-mêmes deviennent multifonctionnels. La salle d'exposition de la journée devient salle de concert ou de cinéma le soir. La construction se focalise sur la réponse aux besoins liés au vieillissement de la population : **l'habitat communautaire prend une place importante dans la construction neuve**. En conséquence, la consommation d'énergie nécessaire à l'activité du bâtiment dans l'industrie se réduit fortement.

Ce scénario contient également **une diminution de la surface par personne**. Surface tertiaire, d'abord, qui revient à un ratio similaire à celui observé en 1990 (soit 12 m² par habitant). Surface de logements, ensuite, sous l'effet d'une cohabitation plus développée (notamment chez les personnes âgées) et d'une meilleure adaptation de la taille des logements à celle des ménages.

À l'échelle du bâtiment, ce scénario implique une **rénovation énergétique à un rythme et avec un niveau d'ambition énergétique sans commune mesure par rapport au rythme tendanciel**. Les objectifs du Dispositif Éco Énergie tertiaire sont atteints, l'ensemble des surfaces assujetties s'engageant sur la trajectoire du Décret (- 60 % de consommation d'énergie finale en 2050 par rapport à 2010). Au total, 80 % des logements présents dans le parc en 2015 font l'objet d'une rénovation à un niveau BBC Rénovation ou plus (alors que moins de 1 % des logements sont labéllisés BBC Rénovation en 2020[21]). La rénovation oriente les activités du bâtiment et donc les consommations énergétiques des chantiers, à la hausse. Ce scénario comporte une part plus importante de **rénovations BBC par étapes** que S1, pour s'adapter au rythme des ménages. La sobriété s'exprime également dans la réglementation du neuf. La coopération entre acteurs permet de rapprocher les réglementations (neuf/existant, construction/urbanisme/mobilité, logement/tertiaire) pour assurer la flexibilité des bâtiments et intégrer les bénéfices liés au fait de ne pas construire.

En matière de **pratiques énergétiques**, ce scénario implique des évolutions majeures. Le temps de transition moins resserré que dans S1 les rend possibles par la mise en place de nouvelles organisations et normes sociales. Par exemple, **les appareils électroménagers (lave-linge…) sont plus souvent mutualisés.**

L'efficacité énergétique est également présente *via* une amélioration du rendement des équipements. Comme dans S1, le curseur de l'efficacité n'est pas poussé à son plein potentiel. **Plutôt que l'innovation technologique, la priorité est mise sur les nouvelles formes d'organisation qui permettent de mutualiser les appareils, les réparer et améliorer l'accès à la seconde main**.

En ce qui concerne les énergies thermiques, le fioul est éradiqué en 2040. La part du gaz de réseau diminue, mais persiste pour les chaudières à condensation installées lors de rénovations et consommant plus de gaz renouvelable. Les réseaux de chaleur se développent fortement, ainsi que le chauffage au bois et les pompes à chaleur électriques. **C'est le scénario dans lequel la part de chaque vecteur énergétique est la plus équilibrée**. Pompes à chaleur et chauffage au bois équipent environ un tiers des logements en 2050, suivis par les réseaux de chaleur et le gaz, chacun à des niveaux similaires (entre 10 et 15 %). Le solaire thermique se développe fortement, jusqu'à équiper 45 % des maisons individuelles en 2050. Dans le tertiaire, les bâtiments sortent du fioul en 2040 et la part du gaz baisse au profit des réseaux de chaleur et de l'électricité (pompes à chaleur) (*cf.* chapitres ***2.3.1. Mix gaz*** et ***2.3.2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux***). Le photovoltaïque en toiture se développe moins fortement que dans les autres scénarios, la priorité allant aux moyens de production les moins coûteux (PV au sol, puis sur grande toiture).

21 https://www.observatoirebbc.org/.

Ce scénario projette **un fort développement des matériaux et des systèmes constructifs à base de matériaux biosourcés, à un niveau similaire à S1 pour les isolants, un peu moins marqué pour la construction bois**.

Le levier de la compensation des impacts résiduels n'est pas utilisé dans ce scénario.

Les stratégies d'adaptation du parc au changement climatique se basent sur une **anticipation des risques et l'intégration de solutions fondées sur la nature** (murs et toitures végétales, végétation pour limiter la puissance du vent aux abords du bâtiment…).

5.3.2. Hypothèses

Les principales hypothèses du scénario 2 sont présentées dans le *Tableau 21*.

Tableau 21 Scénario 2 – narratif

Ensemble des bâtiments	
Réglementation environnementale des bâtiments neufs	La réglementation associe construction et urbanisme, encadre les consommations réelles, et s'élargit à l'ensemble des enjeux environnementaux tout en anticipant les enjeux de flexibilité des bâtiments. La réglementation repose sur les incitations fortes (ex. : taxation de la consommation marginale). La coopération entre acteurs permet de dépasser les silos existants et rapprocher les réglementations (neuf/existant, construction/urbanisme, logement/tertiaire), pour assurer la flexibilité des bâtiments et prendre en compte les bénéfices liés au fait de ne pas construire. Appui aux économies d'énergie du quotidien. Le design des cuisines s'adapte, en évitant les sources de chaleur près du réfrigérateur ; mise en place de buanderies collectives, d'espaces pour faire sécher le linge…
Modes constructifs	• **Matériaux**. Les modes constructifs bois prennent une part importante, et le recours aux matériaux biosourcés s'accélère. Les matériaux traditionnels tels que nous les connaissons aujourd'hui régressent : l'industrie se transforme pour décarboner sa production (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* et *2.4.3. Puits de carbone*). • **Techniques de mise en œuvre**. Pour le neuf comme pour la rénovation, les solutions de mise en œuvre restent traditionnelles (pénétration de la préfabrication comme pour le scénario tendanciel). • **Gestion des chantiers**. L'efficacité énergétique des chantiers s'améliore fortement, notamment grâce à de meilleures pratiques de conception rendues possibles par la maquette numérique et de meilleures organisations des chantiers. Celle des rénovations augmente également, grâce un effet d'apprentissage. Le réemploi des produits et matériaux de construction se développe.
Adaptation au changement climatique	Les stratégies d'adaptation du parc au changement climatique se basent sur une anticipation des risques et l'intégration de solutions fondées sur la nature (murs et toitures végétales, végétation pour limiter la puissance du vent aux abords du bâtiment…) (*cf.* chapitre *1.3. Adaptation au changement climatique*).
Résidentiel	
Logements neufs	• **Volume de construction de logements neufs**. Le nombre annuel de logements construits baisse significativement. Le besoin en logements baisse, du fait à la fois du ralentissement de la croissance démographique et de pratiques de cohabitation des personnes âgées. Les besoins créés par l'augmentation de la population sont absorbés principalement par optimisation du parc de bâtiments existants (transformation de résidences secondaires en principales, résorption de la vacance). Les résidences secondaires sont mutualisées. • **Typologie des logements neufs.** Baisse drastique de la part des maisons individuelles au profit de petits collectifs ou d'habitat dense individualisé. • **Qualité thermique**. L'amélioration des performances énergétiques des logements s'accélère. Les logements construits atteignent au moins un niveau BEPAS ou BEPAS+ à partir de 2030. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Fioul et gaz disparaissent au profit des chauffe-eau thermodynamiques. Le solaire thermique se développe avec un appoint pompe à chaleur : il se développe fortement, jusqu'à équiper 45 % des maisons individuelles en 2050. Le fort développement des réseaux de chaleur entraîne un raccordement important des logements collectifs. • **Équipements et énergie de chauffage**. Arrêt du gaz au profit d'une diversité d'EnR (bois, pompes à chaleur) et des réseaux de chaleur urbains. • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. L'application des principes de bioclimatisme dans les constructions neuves permet de diminuer le besoin de climatisation. Le taux d'équipement augmente cependant *via* les pompes à chaleur réversibles.

Suite page suivante

Logements existants	• **Politique de rénovation énergétique des logements**. Une politique de rénovation ambitieuse, axée sur l'urgence climatique et la sobriété, se développe. Elle se cale sur les opportunités de rénovation afin de respecter la logique d'action des maîtres d'ouvrage (rénovation lors des transactions, par exemple). La priorité est donnée à la baisse du besoin énergétique des logements. Les rénovations énergétiques performantes par étape (*i.e.* permettant d'atteindre au moins les critères du label BBC Rénovation 2009) deviennent majoritaires. Les rénovations par geste non connectées à une trajectoire de performance disparaissent. En 2050, on arrive à un parc rénové à un haut niveau de performance énergétique. • **Besoins et qualité thermique**. Le besoin de chaud diminue très fortement du fait de la rénovation thermique, d'un dimensionnement au plus juste des systèmes et de la généralisation, dans les logements non encore rénovés, d'habitudes de sobriété (chauffer seulement quelques pièces…) sans perte de confort. Le besoin de froid baisse sous l'effet combiné de la rénovation, d'une gestion des îlots de chaleur et de l'utilisation de la climatisation seulement pour les périodes les plus chaudes (le rafraîchissement étant assuré par des gestes de type surventilation nocturne le reste du temps). • **Équipements et énergies de chauffage.** Le changement d'énergie s'accélère, sous l'effet du rythme important de rénovation, qui vient s'ajouter au remplacement des équipements en fin de vie. Le fioul est éradiqué en 2040. Le gaz continue à être utilisé, notamment avec des chaudières à condensation installées lors de rénovations. Les réseaux de chaleur se développent fortement, ainsi que le chauffage au bois et les pompes à chaleur électriques. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Pour les systèmes non combinés, les besoins sont maîtrisés, les EnR contribuent de façon significative à la production d'ECS. Le reste des besoins est couvert par l'effet Joule. • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. Le taux de climatisation augmente pour gérer les périodes de canicule, mais tous les logements ne sont pas équipés en 2050. La rénovation a permis le choix de la meilleure technologie pour chaque logement, en cohérence avec le système de chauffage. Les climatiseurs mobiles sont moins utilisés, les PAC se développent. Les climatiseurs monosplits restent une solution pour climatiser une seule pièce (dans une logique de sobriété).
Vie quotidienne	• **Volume d'eau chaude sanitaire par personne**. Le volume baisse de 10 % à 2050 (évolution des normes d'hygiène du type douche quotidienne). • **Température de consigne de chauffage**. La température de consigne moyenne baisse légèrement (1 °C), sous l'effet des comportements de restriction (on chauffe seulement certaines pièces, par exemple) et d'un meilleur confort des logements rénovés. • **Produits blancs**. La consommation énergétique recule graduellement sur l'ensemble de la période, au fur et à mesure que les mesures d'accompagnement à l'évolution des pratiques de l'ensemble des ménages se mettent en place. Baisse du nombre de cycles (lave-linge, sèche-linge…), mutualisation d'équipements (aspirateurs, lave-linge…). Évolution des comportements d'usage (utilisation très majoritaire du programme éco, absence de programmes intensifs, meilleur remplissage des machines). Les ménages optent pour des équipements de seconde main ou issus d'un reconditionnement très qualitatif pour tous les produits et, en cas d'indisponibilité, ils se tournent vers les équipements les plus efficaces du marché. Cette évolution progressive permet de négocier les conditions de transition des filières économiques, dans un contexte où la baisse du nombre d'équipements et l'allongement de leur durée de vie produit une baisse des volumes de vente. • **Produits bruns et gris**. La consommation d'appareils électroniques se stabilise puis recule grâce à une maîtrise des usages numériques et aux gains d'efficacité. L'évolution se fait par des négociations entre acteurs, qui définissent ensemble les règles sur l'utilisation intelligente des réseaux. Elle est donc plus lente, mais permet d'aller plus loin que dans S1 et de prendre en compte les enjeux sociaux (ex. : prix des équipements réparables, efficaces, durables). Ce qui permet un développement de nouvelles générations de réseaux mobiles et de la fibre optique sans croissance des flux de données. • **Éclairage**. L'effort de sobriété permet de réduire la consommation, malgré les besoins accrus de la population vieillissante : moindre équipement en lampes purement décoratives, aménagements permettant d'accéder à l'éclairage naturel, luminaires moins occultants… Passage au tout LED. La durée de vie des lampes augmente. • **Cuisson**. Les ménages cuisinent plus à domicile, à partir de produits frais et simples. Cette hausse des activités de cuisine est contrebalancée par des pratiques de cuisson sobres en énergie et une limitation du multi-équipement. Les comportements sobres (couvercles, cuisson simultanée de plusieurs plats, etc.) se développent, ainsi que les réglages favorables aux économies d'énergie (mode « éco » par défaut, veille profonde…). L'électrification de la cuisson se poursuit à un rythme plus élevé que dans le scénario tendanciel.
Tertiaire	
Bureaux	Dans un contexte où l'entreprise comme lieu physique perd de sa centralité, le nomadisme se développe. Les surfaces de bureaux deviennent moins importantes. Elles sont mieux distribuées sur le territoire et se mettent à son service en devenant multifonctionnelles. Leur intensité d'usage augmente : lors des périodes d'inoccupation, les locaux sont utilisés pour d'autres activités (sportives, culturelles, associatives). Dans une logique de sobriété, le niveau de service des bureaux n'augmente pas (pas de conciergerie, de services à la personne…). La gestion de l'obsolescence se fait par la rénovation, mais aussi l'adaptation et le changement d'usage. Une partie non négligeable des anciens espaces de bureaux change d'usage, au gré des besoins des territoires (logement, enseignement, santé…).
Cafés-hôtels-restaurants	Le secteur du tourisme se réoriente totalement avec la prise en compte de ses impacts environnementaux et les premiers effets du changement climatique. L'image du voyage évolue. L'aventure se passe au coin de la rue. Le tourisme pour vacances/loisirs change aussi. Les courts voyages de type *city breaks* sont remplacés par des micro-aventures près de chez soi (*staycation*, dépaysement de proximité) Les modes actifs se développent (cyclotourisme et marche). Le tourisme d'affaires se réduit. Les voyageurs cherchent avant tout des hébergements simples, sans services associés (piscine, salle de sport…). Les restaurants s'engagent dans la transition écologique et étendent la palette de leur offre (bistro rural multiservices, cantines pour personnes âgées…) sur tout le territoire. Les cartes deviennent plus simples et plus orientées vers des produits locaux/des plats du jour.
Commerces	La place de la consommation de biens se réduit. Au vieillissement de la population s'ajoute une évolution des comportements (réparation, baisse du nombre d'objets possédés). Le commerce opère une grande mue : les commerces réinvestissent les centres-villes et les quartiers résidentiels. On assiste au développement d'un maillage serré de petits commerces multithématiques alliant vente et réemploi/réparation (couture, électroménager…), moins spécialisés que par le passé mais plus proches de chez soi. Le numérique et le e-commerce permettent d'optimiser le réemploi.

Suite page suivante

Enseignement-recherche	Les établissements d'enseignement sont moins spacieux. Ils ouvrent leurs portes aux autres usages le soir et le week-end (sports, loisirs, cantine…).
Santé	Les besoins en bâtiments de santé suivent les évolutions démographiques, tout en modérant la surface par personne. La numérisation des établissements de santé se poursuit. Les établissements ne développent pas de nouveaux services (magasins, restaurants…). La gestion de l'obsolescence se fait en priorité *via* la rénovation ou le changement d'usage.
Habitat communautaire	L'habitat communautaire se développe pour répondre principalement aux besoins liés au vieillissement de la population. Cet habitat accueille en majorité des personnes âgées en situation de dépendance, les personnes non dépendantes restant plus souvent dans le parc résidentiel (colocation intergénérationnelle et maintien à domicile pour les plus âgés, logement abordable pour les personnes en difficulté sociale…). Les services offerts permettent de diminuer les consommations d'énergie (mutualisation des équipements…).
Sports, loisirs, culture	Les activités du temps libre évoluent. La prise de conscience de l'impact environnemental de certaines pratiques et l'organisation du secteur pour proposer des alternatives séduisantes aux formes de loisirs les plus énergivores permet une transition vers des pratiques culturelles moins consommatrices d'énergie. Les activités de plein-air, les événements culturels et des micro-aventures locales se développent. Lorsqu'elles se déroulent en intérieur, ces activités prennent place dans des bâtiments multifonctionnels, conçus pour pouvoir héberger une multitude d'activité (concert, expo…). Les équipements sportifs énergivores (ex. : patinoires) baissent. Les salles de sports publiques comme privées sont « sobres », avec des équipements *low tech* et robustes. Le rééquilibrage territorial des lieux de vie conduit à une réaffection de certains logements en lieux culturels ou sportifs (par exemple : une maison d'un lotissement pavillonnaire transformée en lieu de sociabilité).
Data centers	Prise de conscience de l'impact du numérique. Diminution de la consommation énergétique. La croissance du volume de données hébergés ralentit à partir de 2030 pour devenir nulle dans les années 2040. Ce phénomène se combine à une meilleure efficacité énergétique. • **Volume de données**. La croissance de volume de données des petits data centers (5G, Internet des objets…) reste tendancielle jusqu'à 2030. Elle diminue de 10 % en 2031 puis à partir de 2032, par palier de 5 % tous les ans pour devenir nulle à partir de 2037. La croissance de volume de données des gros data centers (hyperscale, gros hébergeurs…) est de 15 % par an jusqu'en 2050, similaire au scénario tendanciel. • **Type de data centers**. Développement des data centers locaux. • **Efficacité énergétique de la partie informatique**. L'efficacité de traitement des données des petits data centers et des gros augmente de 13 % par an jusqu'en 2050, de la même façon que pour le scénario tendanciel. • ***Power Usage Effectiveness* (PUE)**. Le PUE des petits data centers est de 2,10 en 2020 et diminue de 2 % tous les ans (= 1,15 en 2050). Le PUE des gros data centers est de 1,80 en 2020 et diminue de 2 % par an tous les ans pour atteindre le palier de 1,02 à partir de 2048. Cette évolution du PUE est similaire au scénario tendanciel.

5.3.3. Dynamique du parc

RÉSIDENTIEL

En 2050, le parc de logements est constitué de 32 millions de résidences principales (dont d'anciennes résidences secondaires et logements vacants), auxquelles viennent s'ajouter 4 millions de résidences secondaires et logements vacants. **Au bilan, 16 % du parc de résidences principales (soit 5 millions de logements) a été construit après 2015.** En moyenne, 149 000 logements sont construits par an entre 2015 et 2050. Le rythme de construction décroît très fortement : il atteint une moyenne de 69 000 logements par an sur la période 2040-2050. Environ 91 000 logements sont détruits par an en moyenne.

L'ensemble des logements existants en 2015 et non démolis ont fait l'objet d'une rénovation énergétique, d'ampleur plus ou moins marquée. **Au total, 81 % ont été rénovés à un niveau BBC Rénovation ou plus**, 14 % ont fait l'objet d'une rénovation touchant l'ensemble des postes de travaux mais sans inscription dans une trajectoire de performance et 5 % ont été rénovés seulement en partie. En moyenne, 618 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 524 000 permettant d'atteindre le niveau BBC ou plus (passif). **La rénovation accélère très fortement sur la période 2020-2030 : elle atteint près d'un million de rénovations complètes** (c'est-à-dire concernant l'ensemble de l'enveloppe du logement et ses équipements) par an. Puis la dynamique décroît pour se stabiliser autour de 500 000 rénovations complètes par an.

TERTIAIRE

L'évolution du parc bâti est similaire à celle du scénario 1.

5.3.4. Consommation d'énergie

CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE

La consommation d'énergie finale liée à la demande du secteur du bâtiment (imports inclus, exports exclus) décroît fortement. Elle passe de 52 TWhEF en 2014 à **11 TWhEF en 2050**. La production d'acier est le premier poste de consommation (28 %) (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR LES CHANTIERS

La consommation d'énergie des chantiers s'oriente dans un premier temps à la hausse, sous l'effet de la

rénovation, malgré la baisse de la construction neuve, une accélération de l'efficacité énergétique permise par de meilleures pratiques de conception (maquette numérique) et une meilleure gestion de l'énergie sur les chantiers. Elle passe de 11TWhEF en 2015 à 23 TWhEF en 2030. Une fois le parc rénové, la consommation des chantiers baisse ensuite pour atteindre en 2050 des niveaux moins importants qu'en 2015 (9TWhEF, soit - 16 % entre 2015 et 2050).

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS

RÉSIDENTIEL

Le parc de logements consomme au total 247 $TWhEF_{PCI}$ en 2050, dont 198 $TWhEF_{PCI}$ pour la consommation des résidences principales (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement). La consommation d'énergie du résidentiel (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement) baisse de 55 % par rapport à 2015. Le chauffage y est l'usage prépondérant et il repose sur le recours au gaz de réseau, puis à l'électricité et au bois. Les consommations de bois énergie diminuent sur la période mais permettent d'augmenter très significativement le nombre de logements chauffés (de 4 M à 10 M), grâce à la baisse du besoin thermique et l'amélioration des rendements. Il est suivi des équipements blancs et bruns, dont la consommation s'élève à 1 MWh/logement en 2050 (contre 1,9 en 2015). La consommation d'énergie liée à l'éclairage et la climatisation baisse.

La consommation de l'ensemble des vecteurs est orientée à la baisse par rapport à 2015, à l'exception des consommations des réseaux urbains, qui doublent et du solaire thermique, dont les consommations se développent considérablement.

Tableau 22 Scénario 2 – consommation du résidentiel en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Résidences principales				Résidences secondaires et logements vacants	Total résidentiel	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
198	41	3	243	4	246	1	247

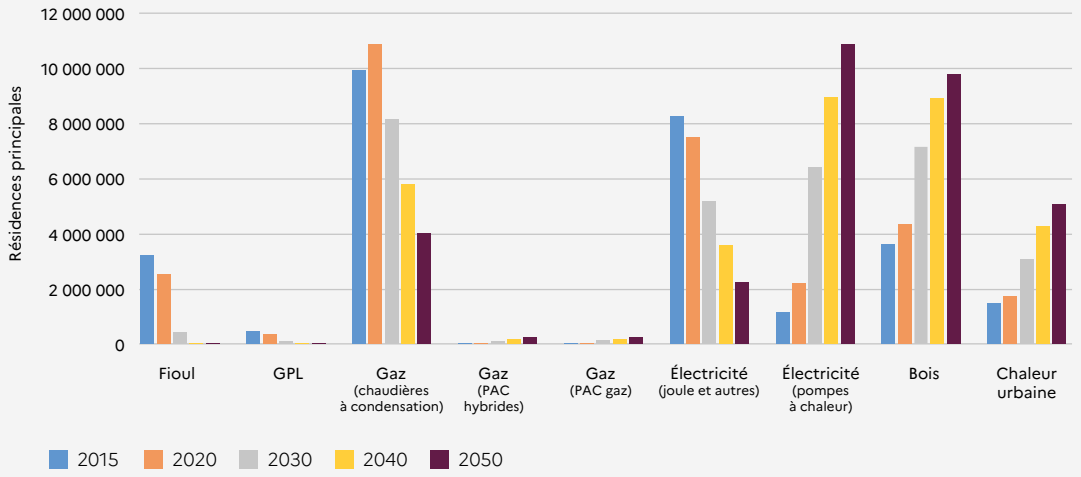
Tableau 23 Scénario 2 – consommation énergétique par usage dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	300	270	178	136	114
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	48	43	34	29	28
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	12	31	38	44
Équipements	70	68	57	50	46
Éclairage	8	3	2	3	2
Climatisation	2	4	1	1	1
Ventilation	6	6	6	7	6
Auxiliaires	1	1	1	1	1
TOTAL	**442**	**407**	**309**	**264**	**243**

Tableau 24 Scénario 2 – consommation énergétique par vecteur dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Chaleur urbaine	16	17	22	26	23	+ 42 %
Réseau de gaz	140	130	75	45	29	- 80 %
Fioul domestique	53	39	5	0	0	- 100 %
Bois	77	69	62	54	53	- 31 %
Électricité (dont consommation des PAC)	142	135	114	102	93	- 34 %
GPL	7	5	1	0	0	- 95 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**436**	**396**	**278**	**226**	**198**	**- 55 %**
Solaire thermique	1	1	2	3	3	+ 239 %
Chaleur EnR puisée par les PAC	5	11	29	35	41	+ 649 %
TOTAL	**442**	**407**	**309**	**264**	**243**	**- 45 %**

Graphique 3 Scénario 2 – nombre de résidences principales par équipement de chauffage



TERTIAIRE

La consommation d'énergie du secteur tertiaire s'établit à 149 $TWhEF_{PCI}$ en 2050. Ce chiffre recouvre les évolutions combinées :

- **des branches CEREN, dont la consommation baisse de 53 % (105 $TWhEF_{PCI}$ en 2050)** sous l'influence combinée de la rénovation énergétique, de l'adoption d'équipements de chauffage plus efficaces (pompes à chaleur) et de la baisse globale de surface. En 2050, 71 % du parc 2015 est rénové selon la trajectoire du Décret Éco Énergie Tertiaire, soit 497 millions m² (surface chauffée) ;

- **d'une baisse des consommations des secteurs hors CEREN :** la consommation des data centers baisse pour atteindre 1 TWh en 2050, contre 2 TWh en 2015.

L'analyse de la consommation des branches CEREN montre **une baisse importante des consommations sur l'ensemble des usages**. Cette réduction concerne également la climatisation en dépit d'une augmentation des surfaces climatisées. Au final, la consommation unitaire moyenne de ces branches d'établit à **129 $KWhEF_{PCI}/m^2$** (surfaces chauffées) en 2050 (contre 231 $KWhEF_{PCI}/m^2$ en 2015).

Le mix énergétique du chauffage et de l'eau chaude sanitaire évolue : l'électricité (pompes à chaleur) et les réseaux de chaleur deviennent les deux principales sources d'énergie du secteur. Les énergies fossiles disparaissent.

Tableau 25 Scénario 2 – consommation du tertiaire en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Secteurs CEREN				Secteurs hors CEREN	Total tertiaire	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
105	20	2	128	22	150	0	149

Tableau 26 Scénario 2 – évolution de la consommation énergétique par usage dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	102	98	64	49	40
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	21	22	17	13	10
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	8	22	25	22
Autres usages thermiques	11	11	10	9	8
Équipements (électricité spécifique et éclairage)	59	60	49	42	36
Cuisson	11	11	9	8	7
Climatisation	19	13	6	5	5
TOTAL branches CEREN	**229**	**224**	**179**	**151**	**128**
Hors CEREN	31	31	28	25	22
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**207**	**177**	**150**

Tableau 27 Scénario 2 – évolution de la consommation d'énergie par vecteur dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Secteurs CEREN						
Chaleur urbaine	9	9	13	16	17	+ 86 %
Réseau de gaz	71	69	43	27	16	- 77 %
Fioul domestique	28	25	6	0	0	- 100 %
Bois	1	2	2	2	2	+ 38 %
Électricité (dont consommation des PAC)	109	107	90	80	69	- 36 %
GPL	4	4	2	1	0	- 88 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**222**	**216**	**156**	**126**	**105**	**- 53 %**
Solaire thermique	0	0	1	2	2	
Chaleur EnR puisée par les PAC	6	8	22	24	20	+ 252 %
TOTAL secteurs CEREN	**228**	**224**	**179**	**151**	**128**	**- 44 %**
Secteurs hors CEREN (électricité)	31	31	28	25	22	- 29 %
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**207**	**177**	**150**	**- 42 %**

5.3.5. Émissions de GES

ÉMISSIONS DE GES POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS[22]

Les émissions de GES liées à la combustion d'énergie fossile dans le bâtiment passent de 70 $MtCO_2eq$ en 2015 à **1,8 $MtCO_2eq$ en 2050**. L'évolution à la baisse du contenu carbone des réseaux permet également d'obtenir une baisse des émissions liées à la production d'électricité et réseaux de chaleur alimentant les bâtiments, qui s'établissent à 1,9 $MtCO_2eq$ en 2050.

STOCKAGE DE CO_2 DANS LES MATÉRIAUX

Le stockage de CO_2 dans les matériaux de construction est etimé à **4,8 $MtCO_2$/an en 2050** (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

5.3.6. Consommation de ressources

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION NEUVE

La consommation de matériaux pour la construction s'élève, en cumulé entre 2015 et 2050, à :

- **670 Mt pour la construction de logements neufs** (EHPAD inclus);
- **114 Mt pour les bâtiments tertiaires** de grandes surfaces commerciales, d'hôtel, d'enseignement et de bureau.

Ce sont les granulats qui représentent le volume le plus important (334 Mt), suivis par le sable (256 Mt) et le ciment (82 Mt). Leurs parts respectives sont identiques à celles de S1 (*cf.* *Tableau 46* pour le détail des matériaux consommés). **Le volume nécessaire d'isolants biosourcés** (dont les fibres et laines de bois) **reste stable entre 2015 et 2050** (environ 30 kt par an). Leur consommation est évaluée à un peu plus de 1000 kt en cumulé entre 2015 et 2050, soit environ 23 % du total des consommations d'isolants.

Ce volume cumulé traduit :

- **une division par sept des consommations entre 2015 et 2050 pour le résidentiel** (6 Mt pour l'année 2050 contre 43 Mt en 2015);
- **une division par quatre des consommations pour le tertiaire** (grandes surfaces commerciales, hôtel, enseignement et bureau) entre 2015 et 2050 (2 Mt par an pour l'année 2050 contre 8 Mt 2015).

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la construction de l'ensemble des bâtiments** (résidentiels, tertiaires, industriels et de stockage, agricoles) **baisse de 22 % par rapport à 2015** et ce malgré une part de modes constructifs comprise entre 30 % et 40 % suivant le type de bâtiment ou d'usage. Cette réduction s'explique par la baisse de la construction. La consommation de bois évolue ainsi de 1,7 Mm^3 en 2015 à 1,2 Mm^3 en 2035 (40 % feuillus, 60 % résineux) et **1,4 Mm^3 en 2050** (55 % feuillus, 45 % résineux) (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* pour les ressources disponibles pour chaque scénario).

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA RÉNOVATION

Les travaux relatifs à la rénovation énergétique BBC des logements construits après 2012 (donc non soumis à la RT 2012) **requièrent, en cumulé entre 2015 et 2050, 75 Mt de matériaux** (*cf.* *Tableau 47* pour le détail des matériaux). Les isolants biosourcés représentent 60 % des quantités d'isolants utilisés entre 2015 et 2050 (soit 10,8 Mt).

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la rénovation** (énergétique et non énergétique) **de l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires augmente** pour passer de 2,5 Mm^3 en 2015 à 3,7 Mm^3 en 2035 (30 % feuillus, 70 % résineux) et **4,6 Mm^3 en 2050** (40 % feuillus, 60 % résineux). Pour les bâtiments industriels, de stockage et agricoles, cette consommation est considérée comme négligeable.

PRODUCTION DE DÉCHETS LIÉE À L'ACTIVITÉ DU BÂTIMENT

Les déchets du bâtiment s'orientent à la baisse du fait du fort ralentissement de la construction neuve. Ils passent de 42 Mt en 2015 à **37 Mt en 2050**. Le réemploi se développe pour atteindre 3,72 Mt en 2050, soit 10 % du volume de déchets généré par le bâtiment (*cf.* chapitre *2.4.1 Déchets* pour la méthodologie de chiffrage).

Les déchets liés à la rénovation BBC des logements constituent une fraction des déchets du bâtiment. En cumulé sur la période 2015-2050, ils représentent 16,1 Mt pour les matériaux retirés et les chutes de mise en œuvre (*cf.* *Tableau 50* pour le détail des matériaux). La rénovation entraîne la dépose de 180 millions de baies (bois et PVC) (*cf.* *Tableau 51* pour le détail des éléments déposés).

22 À la date de publication de ce rapport, les évaluations GES réalisées dans ce chapitre sectoriel n'ont pas pu prendre en compte les derniers bouclages concernant les facteurs d'émissions des vecteurs gaz et électricité, en raison des interactions entre ces vecteurs. Ces modifications seraient de second ordre et ne modifient pas les grandes conclusions de ce chapitre.

5.4. Scénario 3 : rénovation massive et déconstruction-reconstruction

5.4.1. Philosophie globale

Le défi de ce scénario consiste à trouver **la ligne de crête d'une décarbonation qui ne passe pas par une modification en profondeur de nos modes de vie**. L'accent est mis sur l'innovation technique pour assurer une meilleure efficacité des équipements, sur le recours à des énergies décarbonées et sur la compensation. À l'instar du scénario tendanciel, les seuls leviers d'efficacité explorés concernent la rénovation du bâti.

À l'échelle du parc, ce scénario se caractérise par la déconstruction-reconstruction à grande échelle de logements devenus obsolètes (localisation, vieillissement de la population, densification des métropoles, changement climatique…). **Cette stratégie de gestion de l'obsolescence conduit à construire plus que le rythme tendanciel**, à un niveau similaire à celui des années 1990-2020. La surface par personne se réduit sous l'effet de la densification liée à la métropolisation. Dans le tertiaire, le ratio de surface par habitant atteint 14 m²/personne en 2050 (contre 15 m²/personne en 2015). Si la croissance de la construction de bureaux se tasse (évolution du travail, enjeux d'espace en Métropole), l'habitat communautaire prend le relai.

À l'échelle du bâtiment, le scénario implique une **stratégie de rénovation qui s'efforce d'équilibrer les efforts entre baisse du besoin et décarbonation de l'énergie**. On cherche à faire suffisamment baisser le besoin thermique pour permettre l'installation d'équipements efficaces, mais sans forcément isoler au maximum (notamment pour des raisons de coûts…). Ainsi les rénovations touchant l'ensemble des postes de travaux mais sans s'inscrire dans une trajectoire BBC (rénovation par geste plutôt que globale) sont-elles majoritaires. Dans le tertiaire, la rénovation énergétique du parc s'accélère pour suivre et atteindre les objectifs du Dispositif Éco Énergie Tertiaire. En 2050, 72 % des locaux tertiaires présents en 2015 (soit 595 millions m² de surfaces chauffées) ont fait l'objet d'une rénovation ambitieuse (réduction de 60 % des consommations d'énergie finale par rapport à 2010). Les bâtiments neufs font également l'objet d'une amélioration rapide de leur performance sous l'égide d'une réglementation qui met l'accent sur l'énergie et le carbone et appuie l'innovation technologique.

Ce scénario explore particulièrement **l'efficacité énergétique rendue possible par le progrès technologique**. Le rendement de certains équipements s'améliore. Par exemple, un soutien plus fort à l'innovation et aux achats moins impactants pour l'environnement ainsi qu'une plus grande sensibilisation des acheteurs, conduisent à une amélioration accélérée (au-delà des réglementations) de l'efficacité des équipements électroménagers. Pour certains appareils du quotidien cependant (fours par exemple…), ce scénario intègre une légère remontée des puissances due à la généralisation des appareils connectés. L'efficacité des data centers s'améliore sous l'impulsion des politiques publiques et l'usage des données poursuit une augmentation tendancielle. La majorité des appareils de climatisation installés présentent un bon rendement.

Les énergies moins carbonées sont au cœur de ce scénario, avec le déploiement de pompes à chaleur et des réseaux de chaleur. Le changement d'énergie s'accélère, sous l'effet du rythme important de rénovation. Le fioul baisse drastiquement. Le gaz réseau continue à être utilisé, notamment avec des pompes à chaleur hybrides et une part significative de gaz renouvelable, pour gérer la pointe sur le réseau électrique. Les réseaux de chaleur se développent fortement, sous l'effet de la métropolisation et de la construction neuve. **C'est le scénario dans lequel, en 2050, le nombre de logements raccordés à un réseau de chaleur** (6,6 millions, soit 19 % du parc) **et utilisant une PAC hybride** (5,7 millions soit 17 %) **est le plus élevé**. Le solaire thermique se développe fortement, jusqu'à équiper 45 % des maisons individuelles en 2050. Dans le tertiaire, les bâtiments sortent du fioul en 2040 et la part du gaz réseau baisse au profit des réseaux de chaleur et de l'électricité (pompes à chaleur). Le photovoltaïque en toiture se développe fortement, en majorité en grande toiture, du fait de la baisse des coûts qui améliore la rentabilité de l'autoconsommation, elle-même encouragée par le développement des véhicules électriques.

Les modes constructifs évoluent vers une industrialisation et une préfabrication pour répondre à la construction neuve de logements collectifs. L'offre de matériaux et de systèmes constructifs moins carbonés se développe. Ceux-ci sont en partie des matériaux biosourcés mais également des matériaux traditionnels (béton, terre cuite, acier) moins carbonés. Les isolants biosourcés représentent 29 % du volume d'isolants utilisés entre 2015 et 2050 pour la rénovation énergétique des logements.

Dans ce scénario, le levier de la **compensation** est actionné de deux manières. D'une part, la réglementation environnementale la rend possible pour les bâtiments neufs ne parvenant pas à atteindre leurs objectifs. Elle valorise le stockage de carbone dans le bâtiment ou l'investissement dans des projets de rénovation de bâtiments existants. D'autre part, les émissions du secteur ne pouvant être compensées par les mesures précédentes, elles s'ajoutent à celles

d'autres secteurs et rendent nécessaire le recours, à l'échelle française, aux puits de carbone technologiques faisant ainsi porter à d'autres une partie de la responsabilité de la trajectoire de transition.

La stratégie d'adaptation du parc au changement climatique est basée sur les technologies : climatisation, mise en place de capteurs pour détecter les départs de feu de forêt à proximité des bâtiments… La construction de logements neufs s'appuie sur le bioclimatisme (logements traversants, etc.) et sur des technologies d'inspiration biomimétique (reconstruction de bâtiments inspirés de la nature…).

5.4.2. Hypothèses

Les principales hypothèses du scénario 3 sont présentées dans le *Tableau 28*.

Tableau 28 Scénario 3 - narratif

Ensemble des bâtiments	
Réglementation environnementale des bâtiments neufs	La réglementation met l'accent sur l'énergie et le carbone. Elle appuie l'innovation (nouvelles technologies, bioclimatisme…). Elle permet de compenser les émissions résiduelles.
Modes constructifs	• **Matériaux**. Les matériaux et systèmes constructifs sont en partie biosourcés mais également des matériaux traditionnels (béton, terre cuite, acier) décarbonés. Les modes constructifs bois progressent. Développement du recyclage des matériaux de construction, notamment pour les produits de gros œuvre issus de la déconstruction des bâtiments (*cf.* chapitres *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* et *2.4.3. Puits de carbone*). • **Techniques de mise en œuvre**. Industrialisation/préfabrication développée pour répondre à la construction neuve de logements collectifs. • **Gestion des chantiers**. L'efficacité énergétique des chantiers s'améliore fortement, notamment grâce à de meilleures pratiques de conception rendues possibles par la maquette numérique, de meilleures organisations des chantiers et la préfabrication. Celle des rénovations augmente également, grâce un effet d'apprentissage. Le réemploi des produits et matériaux de construction se développe très fortement, grâce aux techniques de déconstruction/reconstruction.
Adaptation au changement climatique	La stratégie d'adaptation du parc au changement climatique est basée sur les technologies : climatisation, mise en place de capteurs pour détecter les départs de feu de forêt à proximité des bâtiments… La construction de logements neufs s'appuie sur le bioclimatisme (logements traversants, etc.) et sur des technologies d'inspiration biomimétique (reconstruction de bâtiments inspirés de la nature…) (*cf.* chapitre *1.3. Adaptation au changement climatique*).
Résidentiel	
Logements neufs	• **Volume de construction de logements neufs**. Le rythme historique de construction se poursuit. Le besoin en logements baisse, du fait du ralentissement de la croissance démographique. C'est la décohabitation liée au vieillissement qui est le facteur majeur de demande. On répond à ce besoin par la construction neuve, dans une optique de « Nouvel esprit haussmannien », *i.e.* la déconstruction-reconstruction des bâtiments obsolètes (pour des raisons techniques, sociales, géographiques…). • **Typologie des logements neufs**. La construction neuve donne la priorité au grand collectif pour densifier les métropoles. • **Qualité thermique**. Accélération de l'amélioration des performances énergétiques des logements. Les logements construits atteignent au moins un niveau BEPAS ou BEPAS+ à partir de 2030. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Disparition du fioul et du gaz réseau au profit des chauffe-eau thermodynamiques. En logement collectif, développement de PAC hybrides et raccordement aux réseaux de chaleur qui se développent fortement. Le solaire thermique se développe fortement, jusqu'à équiper 45 % des maisons individuelles en 2050. • **Équipements et énergie de chauffage**. Le gaz est remplacé par des EnR électriques (pompes à chaleur, y compris des PAC hybrides) et des réseaux de chaleur. • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. L'application des principes de bioclimatisme dans les constructions neuves permet de diminuer le besoin de climatisation. Le taux d'équipement augmente cependant *via* les pompes à chaleur réversibles et le recours à la géothermie.
Logements existants	• **Politique de rénovation énergétique des logements**. La rénovation des logements, axée sur l'urgence climatique et recherchant l'équilibre entre efficacité énergétique et décarbonation, est ambitieuse. Le ciblage se fait en fonction du niveau d'émission GES des logements. Les rénovations se font majoritairement par bouquets de travaux (changement d'équipement, isolation d'une partie de l'enveloppe), mais sans inscription dans une trajectoire de performance permettant d'atteindre le niveau BBC Rénovation. Le rythme de rénovation augmente de façon significative. En 2050, le parc émet peu de CO_2 et son enveloppe est en très grande partie rénovée. • **Besoins et qualité thermique**. Le besoin de chaud comme de froid diminue sous l'effet de la seule rénovation thermique, les pratiques quotidiennes des ménages et le dimensionnement des systèmes n'évoluant pas. Les populations qui se restreignent (en hiver comme en été) sont celles en situation de précarité énergétique. • **Équipements et énergies de chauffage**. Une décarbonation grâce avant tout au déploiement des EnR électriques (notamment les pompes à chaleur double service) et aux réseaux de chaleur. Le changement d'énergie s'accélère, sous l'effet du rythme important de rénovation et vient s'ajouter au remplacement des équipements en fin de vie. Le fioul est éradiqué en 2040. Le gaz continue à être utilisé, notamment avec des PAC hybrides permettant de répondre à un besoin plus important et de gérer la pointe du réseau électrique. Le nombre de logements raccordés au réseau gaz est maintenu constant. Les réseaux de chaleur se développent fortement ainsi que les pompes à chaleur électriques. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Pour les systèmes non combinés, le chauffe-eau thermodynamique prend le relais de l'effet Joule dans la production d'ECS. Peu de production *via* le solaire. • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. La climatisation se généralise. La rénovation a permis le choix de la meilleure technologie pour chaque logement, en cohérence avec le système de chauffage. Les climatiseurs mobiles sont moins utilisés, les PAC se développent, ainsi que de nouvelles technologies très efficaces, fruit de la R&D d'un secteur en pleine expansion, mais elles restent résiduelles.

Suite page suivante

Vie quotidienne	• **Volume d'eau chaude sanitaire par personne**. Le besoin (m³/jour/pers.) n'évolue pas. • **Température de consigne de chauffage**. La température de consigne moyenne baisse légèrement (1 °C), sous l'effet des comportements de restriction (on chauffe seulement certaines pièces, par exemple) et d'un meilleur confort des logements rénovés. • **Produits blancs**. La consommation d'énergie baisse sensiblement grâce à des efforts très importants sur l'efficacité énergétique des appareils. Par contre les comportements n'évoluent pas vers plus de sobriété, ce qui annule une partie des gains. La tendance à la baisse du nombre de cycles (lave-linge, sèche-linge…) se poursuit, notamment grâce aux appareils connectés et à l'intelligence artificielle. L'efficacité énergétique progresse plus rapidement que dans le scénario tendanciel par un soutien plus fort à l'innovation et aux achats d'appareils performants, ainsi qu'une plus grande sensibilisation des acheteurs. En matière d'achat, le surdimensionnement des appareils par rapport aux besoins reste une pratique courante et la seconde main reste un marché de niche. La durée de vie des appareils augmente cependant grâce à une meilleure réparabilité. • **Produits bruns et gris**. Une augmentation des usages et des flux de données associés et des infrastructures similaires au scénario tendanciel, mais une efficacité plus importante sur les technologiques grâce à un effort important d'optimisation technique. La réparabilité augmente, mais les effets de mode entraînent une forte obsolescence. • **Éclairage**. Légère augmentation du nombre de lampes par logement en raison des besoins accrus de la population vieillissante et peu de changements de comportements ; les consommations globales d'éclairage chutent quand même fortement en raison du passage au tout LED. • **Cuisson**. Les ménages mangent plus souvent à la maison que par le passé (télétravail, vieillissement), mais à partir d'aliments plus transformés/préparés/livrés (plats à emporter). Les petits équipements de cuisson spécialisés (robots, appareils d'aide à la cuisine…) se multiplient. L'efficacité énergétique des équipements s'accélère sous l'effet d'innovations techniques. Les ustensiles communicants permettent de faire légèrement baisser les durées d'utilisation.
Tertiaire	
Bureaux	Dans un contexte où l'entreprise comme lieu physique perd de sa centralité, et où le nomadisme se développe, les bureaux deviennent plus denses, au cœur des métropoles, dans les grands pôles d'immobilier de bureau historiques (Île-de-France, grandes métropoles régionales). Les locaux des entreprises sont adaptés pour accueillir moins de travailleurs à temps plein, et plus d'activités d'échanges (salles de réunion, lieux de convivialité). Le niveau de service augmente (restauration, conciergerie, services à la personne…). L'intensité d'usage des locaux n'augmente pas, la logique étant que la spécialisation des espaces permet d'en optimiser le confort d'usage. L'obsolescence du bâti est gérée par une déconstruction-reconstruction d'ampleur.
Cafés-hôtels-restaurants	La dynamique du tourisme et de fréquentation des restaurants suit le scénario tendanciel, mais la rénovation énergétique du bâti s'accélère. On assiste à un fort développement de la livraison à domicile qui devient un service complémentaire offert par les restaurants à part entière avec le service à table. Certains restaurants basculent dans le « tout livraison maison » et utilisent des cuisines partagées qui regroupent les cartes de restaurants populaires, pour démultiplier leur capacité de livraison. Les cantines des bureaux, inutilisées le soir et le week-end et peu rentables (télétravail), sont transformées en restaurants commerciaux. Ce phénomène se développe de façon importante car il correspond bien aux modes de vie urbains.
Commerces	La consommation de biens reste au cœur de la société. Cependant, dans une société vieillissante et de plus en plus préoccupée par l'environnement, les postes arrivés à maturité ces dernières années (habillement, équipements de la maison…) ne progressent plus. Quelques « poches » de consommation maintiennent une croissance (TIC…). Cela s'accompagne par un fort développement du e-commerce, les quelques centres commerciaux restant achevant leur mue vers le commerce expérientiel. Une complémentarité s'instaure entre canaux physiques et numériques. Les commerces de proximité, notamment alimentaires, se développent.
Enseignement-recherche	Les établissements d'enseignement sont moins spacieux car ils s'insèrent dans des tissus urbains denses. Ils se spécialisent sur leur fonction d'enseignement.
Santé	Les besoins en bâtiment de santé suivent les évolutions démographiques, sur le même rythme que par le passé, sans attention particulière à limiter la surface par personne. La numérisation des établissements de santé se poursuit. Les établissements médicaux développent de nouveaux services (vastes zones d'accueil et de réception, magasins, restaurants, jardins paysagers…). Une gestion de l'obsolescence qui se fait avant tout par la déconstruction/reconstruction.
Habitat communautaire	L'habitat communautaire se développe pour répondre aux besoins liés au vieillissement de la population, aux besoins des étudiants et des personnes en difficulté sociale. Les services offerts tirent à la hausse les consommations d'énergie (domotique, objets connectés…).
Sports, loisirs, culture	Les activités du temps libre se développent, portées par l'essor du numérique, la croissance du pouvoir d'achat, du temps libre des ménages, et le vieillissement de la population. Elles évoluent sans attention particulière à leur impact environnemental. Elles se tournent résolument vers le numérique. Les espaces évoluent pour accueillir ces nouvelles pratiques virtuelles. Les loisirs se déroulent en grande partie en intérieur. La recherche du confort oriente vers la multiplication d'espaces spécialisés (salle de concert + salle d'expo dans deux lieux séparés plutôt qu'espace culturel pouvant accueillir un concert un jour, une expo le lendemain…).
Data centers	Très forte augmentation du volume de données correspondant à la tendance actuelle, particulièrement dans les petits data centers (sous l'influence de la 5G et de l'Internet des objets). Le déploiement des réseaux toujours plus performants ouvre à de nouveaux usages. L'efficacité énergétique s'accroît, mais sans compenser la hausse du volume de données. Très forte augmentation de la consommation énergétique. • **Volume de données**. Le volume de données des petits data centers (5G, Internet des objets…) croît de 50 % par an jusqu'en 2025 puis de 40 % de 2026 à 2040. La croissance diminue ensuite à partir de 2043. Le volume de données des gros data centers (hyperscale, gros hébergeurs…) croît de 15 % par an jusqu'en 2050. Ces croissances correspondent au scénario tendanciel. • **Type de data centers**. Data centers très optimisés au niveau de l'efficacité énergétique, ils qui utilisent majoritairement de l'électricité d'origine EnR. • **Efficacité énergétique de la partie informatique**. L'efficacité des petits data centers croît de 13 % par an jusqu'en 2035 puis de 15 % par an de 2036 à 2050. Celle des gros data centers suit la même logique et augmente de façon similaire au scénario tendanciel jusqu'en 2035 puis accélère à 15 % par an jusqu'en 2050. • ***Power Usage Effectiveness* (PUE)**. Le PUE des petits data centers est de 2,10 en 2020 et diminue de 3 % tous les ans jusqu'à atteindre un palier de 1,02 en 2044 (= 1,15). Le PUE des gros data centers est de 1,80 en 2020 et diminue de 3 % par an tous les ans pour atteindre le palier de 1,02 à partir de 2039.

5.4.3. Dynamique du parc à 2050

RÉSIDENTIEL

En 2050, le parc de logements est constitué de 34 millions de résidences principales, auxquelles viennent s'ajouter 6 millions de résidences secondaires et logements vacants. **Au final, 36 % du parc de résidences principales (soit 12 millions de logements) a été construit après 2015.** En moyenne, 348 000 logements sont construits par an entre 2015 et 2050. Le rythme de construction décroît, mais de façon moins importante que dans le scénario tendanciel : il atteint une moyenne de 262 000 logements par an sur la période 2040-2050. Environ 169 000 logements sont détruits par an en moyenne.

Au total, 99 % des logements existants en 2015 et non démolis ont fait l'objet d'une rénovation énergétique, plus ou moins marquée. Parmi ceux-là, 22 % ont été rénovés à un niveau BBC Rénovation ou plus, **69 % ont fait l'objet d'une rénovation touchant l'ensemble des postes de travaux mais sans inscription dans une trajectoire de performance** et 9 % ont été rénovés seulement en partie. En moyenne, 511 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 125 000 permettant d'atteindre le niveau BBC ou plus (passif). **La rénovation accélère très fortement sur la période 2020-2030 : elle atteint près d'un million de rénovations complètes** (c'est-à-dire concernant l'ensemble de l'enveloppe du logement et ses équipements) par an. Puis la dynamique décroît : la rénovation concerne alors environ 500 000 logements par an entre 2030 et 2040, puis 220 000 à partir de 2040.

TERTIAIRE

Dans ce scénario, le **parc tertiaire se stabilise** et atteint **999 millions de m² de surface chauffée en 2050**, dont 17 % sont des bâtiments construits après 2015. L'habitat communautaire représente 22 % des surfaces construites entre 2015 et 2050, suivi par les bureaux (21 %) et le commerce (19 %).

La surface tertiaire représente en 2050 un ratio de **14 m² par habitant** (contre 15 m² en 2015), actant la densification des espaces liée avant tout à la métropolisation.

5.4.4. Consommation d'énergie

CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE

La consommation d'énergie finale liée à la demande du secteur (imports inclus, exports exclus) décroît. Elle passe de 52 TWhEF en 2014 à **29 TWhEF en 2050**. L'amélioration de l'efficacité énergétique permet de baisser les consommations malgré un taux de construction similaire à celui observé ces trente dernières années. La production d'acier représente la majeure partie des consommations (37 %) (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR LES CHANTIERS

La consommation d'énergie pour les chantiers s'oriente dans un premier temps à la hausse, sous l'effet combiné d'un important volume de construction neuve et de la rénovation. Elle passe de 11 TWhEF en 2015 à 21 TWhEF en 2030. Elle baisse ensuite de façon très importante en fin de période, pour atteindre **5 TWhEF en 2050** (soit - 51 % entre 2015 et 2050). Les gains importants en efficacité sur les chantiers (liés notamment à la préfabrication) permettent en effet de contrebalancer l'augmentation de la construction neuve et de la rénovation.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS

RÉSIDENTIEL

Le parc de logements consomme au total **312 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**, dont 226 TWhEF$_{PCI}$ pour la consommation des résidences principales (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement). La consommation d'énergie du résidentiel (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement) baisse de 48 % par rapport à 2015. Le chauffage y est l'usage prépondérant et il repose sur le recours au gaz, puis à l'électricité et au bois. Il est suivi des équipements blancs et bruns, dont la consommation s'élève à 1,3 MWh/logement en 2050 (contre 1,9 en 2015). La consommation d'énergie pour l'éclairage baisse, celle pour la climatisation augmente.

La consommation de l'ensemble des vecteurs est orientée à la baisse par rapport à 2015, à l'exception des consommations des réseaux urbains, qui doublent et du solaire thermique, qui se développe très fortement.

Tableau 29 Scénario 3 – consommation du résidentiel en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Résidences principales				Résidences secondaires et logements vacants	Total résidentiel	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
226	73	3	303	9	312	1	312

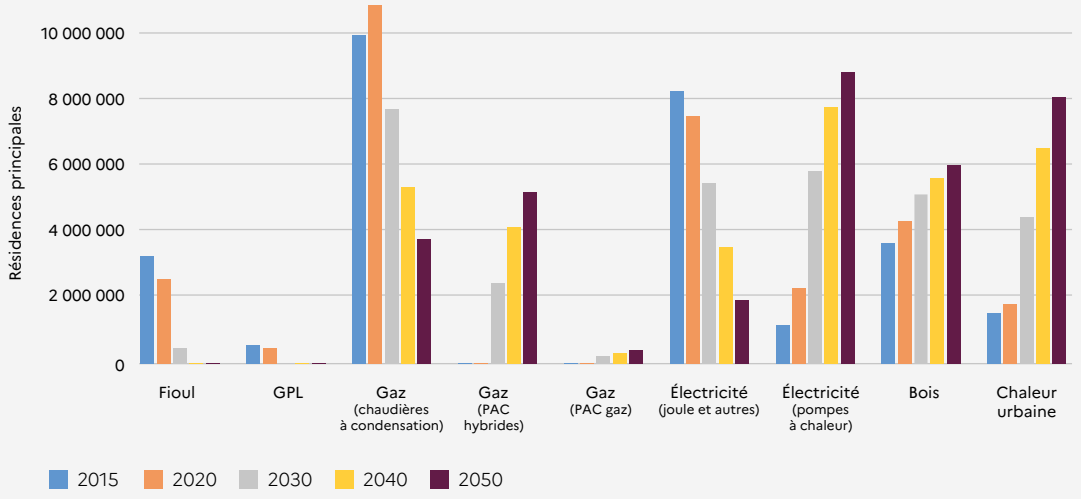
Tableau 30 Scénario 3 – consommation énergétique par usage dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	300	270	192	149	121
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	48	43	35	30	29
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	12	53	70	77
Équipements	70	68	64	61	59
Éclairage	8	3	3	3	3
Climatisation	2	4	6	8	8
Ventilation	6	6	6	6	6
Auxiliaires	1	1	1	1	1
TOTAL	**442**	**408**	**360**	**328**	**303**

Tableau 31 Scénario 3 – consommation énergétique par vecteur dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Chaleur urbaine	16	17	25	28	29	+ 76 %
Réseau de gaz	140	130	83	55	38	- 73 %
Fioul domestique	53	40	6	0	0	- 100 %
Bois	77	69	56	47	42	- 45 %
Électricité dont consommation des PAC)	142	135	136	127	117	- 18 %
GPL	7	5	1	0	0	- 95 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**436**	**396**	**307**	**258**	**226**	**- 48 %**
Solaire thermique	1	1	2	2	3	+ 215 %
Chaleur EnR puisée par les PAC	5	11	52	67	73	+ 1 241 %
TOTAL	**442**	**408**	**360**	**328**	**303**	**- 31 %**

Graphique 4 *Scénario 3 – nombre de résidences principales par équipement de chauffage*



TERTIAIRE

La consommation d'énergie du secteur tertiaire s'établit à **207 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**. Ce chiffre recouvre des évolutions contrastées :

- **une baisse de la consommation des branches CEREN de 38 %** (138 TWhEF$_{PCI}$ en 2050) qui traduit principalement la rénovation énergétique du bâti et l'arrivée dans le parc de bâtiments neufs moins consommateurs. Au total, 72 % du parc 2015 est rénové, soit 595 millions m² (surfaces chauffées) ;

- **une augmentation de la consommation des secteurs hors CEREN**, qui s'explique par la forte augmentation de la consommation des data centers, qui passe de 2 TWh en 2015 à 17 TWh en 2050. Cette hausse de la consommation des secteurs hors CEREN n'annule pas cependant les gains des branches CEREN.

L'analyse de la consommation des branches CEREN montre **une baisse des consommations sur l'ensemble des usages**. Au final, la consommation unitaire moyenne de ces branches s'établit à **141 KWhEF$_{PCI}$/m²** (surface chauffée) en 2050 (contre 231 KWhEF$_{PCI}$/m² en 2015).

Le mix énergétique du chauffage et de l'eau chaude sanitaire est dominé par l'électricité (majoritairement des pompes à chaleur), suivi à part égale par le gaz et les réseaux de chaleur.

Tableau 32 Scénario 3 – consommation du tertiaire en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Secteurs CEREN				Secteurs hors CEREN	Total tertiaire	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
138	28	3	169	39	207	0	207

Tableau 33 Scénario 3 – évolution de la consommation énergétique par usage dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	102	98	64	53	45
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	21	22	19	16	14
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	8	28	32	31
Autres usages thermiques	11	11	10	10	9
Équipements (électricité spécifique et éclairage)	59	60	54	50	46
Cuisson	11	11	10	9	8
Climatisation	19	13	12	13	15
TOTAL branches CEREN	**229**	**224**	**197**	**183**	**169**
Hors CEREN	31	31	28	31	39
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**225**	**214**	**207**

Tableau 34 Scénario 3 – évolution de la consommation d'énergie par vecteur dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Secteurs CEREN						
Chaleur urbaine	9	9	12	15	17	+ 86 %
Réseau de gaz	71	69	46	31	20	- 72 %
Fioul domestique	28	25	1	0	0	- 100 %
Bois	1	2	2	2	2	38 %
Électricité (dont consommation des PAC)	109	107	106	102	98	- 10 %
GPL	4	4	2	1	1	- 87 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**222**	**216**	**169**	**152**	**138**	**- 38 %**
Solaire thermique	0	0	1	2	3	+ 2 238 %
Chaleur EnR puisée par les PAC	6	8	27	30	28	+ 380 %
TOTAL secteurs CEREN	**228**	**224**	**197**	**183**	**169**	**- 26 %**
Secteurs hors CEREN (électricité)	31	31	28	31	39	+ 23 %
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**225**	**214**	**207**	**- 20 %**

5.4.5. Émissions de GES

ÉMISSIONS DE GES POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS[23]

Les émissions de GES liées à la combustion d'énergie fossile dans le bâtiment passent de 70 $MtCO_2eq$ en 2015 à **2 $MtCO_2eq$ en 2050.** L'évolution à la baisse du contenu carbone des réseaux permet également d'obtenir une baisse des émissions liées à la production d'électricité et réseaux de chaleur alimentant les bâtiments, qui s'établissent à 1,9 $MtCO_2eq$ en 2050.

STOCKAGE DE CO_2 DANS LES MATÉRIAUX

Le stockage de CO_2 dans les matériaux de construction s'élève à **3,5 $MtCO_2$/an en 2050** (*cf.* chapitre *2.4.3 Puits de carbone*).

5.4.6. Consommation de ressources

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION NEUVE

La consommation de matériaux pour la construction s'élève, en cumulé entre 2015 et 2050, à :

- **1 290 Mt pour la construction de logements neufs** (EHPAD inclus) ;
- **131 Mt pour les bâtiments tertiaires** de grandes surfaces commerciales, d'hôtel, d'enseignement et de bureau.

Ce sont les granulats qui représentent le volume le plus important (602 Mt), suivis par le sable (462 Mt) et le ciment (147 Mt) (*cf. Tableau 46* pour le détail des matériaux consommés). On observe **un doublement des consommations d'isolants biosourcés (dont les fibres et laines de bois) entre 2015 et 2050** (59 kt pour l'année 2050 contre 30 kt en 2015). Leur tonnage est évalué à 1 700 kt en cumulé entre 2015 et 2050, soit environ 23 % du total des consommations d'isolants.

Ce volume cumulé traduit :

- **une baisse de 42 % des consommations de matériaux pour le résidentiel en 2050 par rapport à 2015** (25 Mt pour l'année 2050 contre 43 Mt en 2015) et ce, malgré un rythme de construction de logements similaire au rythme passé. Cette baisse s'explique par celle de la part de la maison individuelle dans la construction au profit de logements collectifs, moins consommateurs de matériaux à l'unité ;
- **une division par cinq des consommations pour le tertiaire (CHEB) entre 2015 et 2050** (1,65 Mt pour l'année 2050 contre 8 Mt en 2015).

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la construction de l'ensemble des bâtiments** (résidentiels, tertiaires, industriels et de stockage, agricoles) **augmente de 46 % par rapport à 2015**, avec des parts de modes constructifs bois pourtant réduites par rapport à S1 et S2 (comprises entre 20 % et 35 % suivant le type/usage de bâtiment). Cette hausse s'explique par le volume de construction. La consommation de bois évolue ainsi de 1,7 Mm^3 en 2015 à 2 Mm^3 en 2035 (35 % feuillus, 65 % résineux) et à 2,5 M m^3 en 2050 (48 % feuillus, 52 % résineux) (*cf.* chapitre *2.4.2 Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* pour les ressources disponibles pour chaque scénario).

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA RÉNOVATION

Les travaux relatifs à la rénovation énergétique BBC des logements construits après 2012 (donc non soumis à la RT 2012) requièrent, en cumulé **entre 2015 et 2050, 18 Mt de matériaux** (*cf. Tableau 47* pour le détail des matériaux). **Les isolants biosourcés représentent 29 % du volume d'isolants utilisés entre 2015** et 2050 (soit 1,15 Mt). Ce chiffre sous-estime le volume de matériaux nécessaires à la rénovation énergétique dans ce scénario, car il ne prend en compte que les rénovations BBC. Or, dans ce scénario, de nombreux logements font l'objet d'une rénovation complète de leur enveloppe, mais sans atteindre le BBC.

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la rénovation** (énergétique et non énergétique) **de l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires augmente** pour passer de 2,5 Mm^3 en 2015 à 3,15 Mm^3 en 2035 (30 % feuillus, 70 % résineux) et **3,7 Mm^3 en 2050** (40 % feuillus, 60 % résineux). Pour les bâtiments industriels, de stockage et agricoles, cette consommation est considérée comme négligeable.

PRODUCTION DE DÉCHETS LIÉE À L'ACTIVITÉ DU BÂTIMENT

Les déchets du bâtiment s'orientent à la hausse du fait du fort développement de la démolition. Ils passent de 42 Mt en 2015 à **60 Mt en 2050**. Le réemploi se développe très fortement pour atteindre 12 Mt en 2050, soit 20 % du volume de déchets généré par le bâtiment (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets* pour la méthodologie de chiffrage).

23 À la date de publication de ce rapport, les évaluations GES réalisées dans ce chapitre sectoriel n'ont pas pu prendre en compte les derniers bouclages concernant les facteurs d'émissions des vecteurs gaz et électricité, en raison des interactions entre ces vecteurs. Ces modifications seraient de second ordre et ne modifient pas les grandes conclusions de ce chapitre.

Les déchets liés à la rénovation BBC des logements constituent une fraction des déchets du bâtiment. En cumulé sur la période 2015-2050, ils représentent 4 Mt pour les matériaux retirés et les chutes de mise en œuvre (*cf.* ***Tableau 50*** pour le détail des matériaux). Ce chiffre sous-estime le volume de déchets créés par la rénovation énergétique dans ce scénario, car il ne prend en compte que les rénovations BBC.

5.5. Scénario 4 : efficacité énergétique et innovation technique

5.5.1. Philosophie globale

Le défi du scénario 4 est de **réussir l'innovation technologique d'ampleur pour ne pas modifier nos modes de vie**. À ce titre, les deux principaux leviers utilisés sont l'efficacité énergétique et la compensation.

Le choix de ne pas toucher aux modes de vie fait passer la **sobriété au second plan** : les tendances observées par le passé se poursuivent, voire s'accentuent. Ce scénario se caractérise par une technicisation de la réponse aux enjeux environnementaux et sociaux. Cela se traduit par une augmentation du nombre d'appareils connectés en veille permanente (domotique pour faire face au vieillissement de la population ou pour « faciliter » la vie quotidienne, éclairage connecté…) qui se combine à des fonctionnalités toujours plus étoffées (réfrigérateur avec écran, froid ventilé…). Pour les équipements électroménagers et électroniques, des progrès d'efficacité importants sont réalisés, mais l'augmentation du nombre d'appareils, de leur capacité et des durées d'usage se poursuit aussi à un rythme soutenu. À cela s'ajoute **la digitalisation de l'économie** (loisirs connectés, réalité virtuelle, e-commerce…) **qui engendre des volumes de données inédits**. Pour les bâtiments, ce scénario intègre une rénovation à deux vitesses. Les logements dont l'architecture permet **une industrialisation de la rénovation**[24] (*via* la préfabrication…) sont isolés à un niveau très performant (BBC, voire passif). Mais les autres bâtiments poursuivent un rythme tendanciel de rénovation, par geste, sans s'inscrire dans une trajectoire de performance. La rénovation énergétique du parc tertiaire s'accélère sous l'effet du Dispositif Éco Énergie Tertiaire, sans toutefois en atteindre les objectifs[25].

L'efficacité énergétique est un des piliers de ce scénario. Le progrès technique rend possible l'augmentation du rendement des équipements ou l'apparition de nouvelles technologies très efficaces. Pour les équipements thermiques, l'accent est mis sur le **déploiement d'innovations technologiques, notamment sur le segment du parc rénové**. Les innovations d'aujourd'hui deviennent la norme : pompes à chaleur fonctionnant à haute température adaptées à la rénovation des bâtiments difficilement isolables, systèmes de production d'eau chaude associant récupération et pompe à chaleur, système de ventilation régulé en fonction de la qualité de l'air, poêles connectés, vitrages commandables à transparence variable, systèmes numériques optimisant le fonctionnement des bâtiments, nouvelles technologies de climatisation à haut rendement…. Pour les équipements électroménagers et électroniques, des progrès d'efficacité importants sont réalisés (par exemple sur la consommation des veilles, *via* le recours aux pompes à chaleur pour les machines à laver…).

Le changement d'énergie s'accélère sous l'effet du rythme de rénovation qui vient s'ajouter au remplacement des équipements en fin de vie. Il est cependant moins important que dans les autres scénarios, la rénovation ne concernant qu'une partie du parc. **La tendance à la baisse des énergies fossiles et à l'électrification du chauffage se poursuit. C'est le scénario dans lequel, en 2050, le nombre de logements utilisant des pompes à chaleur est le plus élevé** (près de 19 millions, soit 60 % du parc), suivis par les logements chauffés au gaz, qui représentent 28 % du parc (9,5 millions, dont 4,5 millions ayant recours à la PAC hybride). Le solaire thermique se développe fortement, jusqu'à équiper 45 % des maisons individuelles en 2050. Dans le parc tertiaire, les surfaces chauffées au fioul domestique deviennent résiduelles en 2050, au profit de l'électricité (pompes à chaleur) et des réseaux de chaleur (*cf.* chapitres ***2.3.1. Mix gaz*** et ***2.3.2 Froid et chaleur réseaux et hors réseaux***). Le photovoltaïque en toiture se développe fortement, en majorité en grande toiture, du fait de la baisse des coûts qui améliore la rentabilité de l'autoconsommation, elle-même encouragée par le développement des véhicules électriques.

Ce scénario repose également fortement sur la **compensation des émissions résiduelles** (*cf.* chapitre ***2.4.3. Puits de carbone***). Les émissions du secteur du bâtiment s'ajoutent à celles d'autres secteurs et rendent nécessaire le recours, à l'échelle française, aux puits de carbone technologiques, ce qui revient à faire porter une partie de la responsabilité de la trajectoire de transition sur d'autres secteurs.

Les modes constructifs sont marqués par une industrialisation globale de la chaîne de valeur et une préfabrication élevée. La productivité du secteur augmente. Des matériaux moins carbonés innovants se

24 À titre d'exemple, il est estimé à l'heure actuelle que le marché pour de telles rénovations représente environ 9,5 millions de logements (source : Étude pour le programme CEE EnergieSprong France réalisée par Pouget Consultants et Énergies Demain, 2020).

25 Réduction de 60 % des consommations d'énergie finale par rapport à 2010.

développent, ainsi que des modes constructifs nouveaux permettant par exemple de construire sur l'eau dans les zones touchées par la submersion marine.

Les stratégies d'adaptation au changement climatique reposent sur une très forte technicisation : mode constructif adapté à la chaleur comme les matériaux à changement de phase, climatisation, barrières structurelles pour endiguer la montée des eaux… Une anticipation tardive de la gestion du risque pousse les acteurs à mettre en place des solutions palliatives fondées sur des technologies industrielles.

5.5.2. Hypothèses

Les principales hypothèses du scénario 4 sont présentées dans le *Tableau 35*.

Tableau 35 Scénario 4 - narratif

Ensemble des bâtiments	
Réglementation environnementale des bâtiments neufs	La réglementation met l'accent sur l'énergie et le carbone. Elle appuie l'innovation et l'industrialisation. Elle permet de compenser les émissions résiduelles.
Modes constructifs	• **Matériaux**. Offre large de matériaux : traditionnels, biosourcés, décarbonés et plus innovants (ex. : matériaux à changement de phase). Les modes constructifs bois se développent peu (*cf.* chapitres *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* et *2.4.3. Puits de carbone*). • **Techniques de mise en œuvre**. Industrialisation globale de la chaîne de valeur. Préfabrication élevée en neuf (avec part d'import élevée) et surtout en rénovation. Les innovations constructives vont intervenir sur les bâtiments construits en sous-sol ou sur l'eau. • **Gestion des chantiers**. L'efficacité énergétique des chantiers s'améliore fortement, notamment grâce à de meilleures pratiques de conception rendues possibles par la maquette numérique, de meilleures organisations des chantiers et la préfabrication. Celle des rénovations augmente également, grâce à des innovations techniques (amélioration des équipements, exosquettes…). Le réemploi des produits et matériaux de construction se développe.
Adaptation au changement climatique	Les stratégies d'adaptation au changement climatique reposent sur une très forte technicisation (mode constructif adapté à la chaleur comme les matériaux à changement de phase, climatisation, barrières structurelles pour endiguer la montée des eaux…). Une anticipation tardive de la gestion du risque pousse les acteurs à mettre en place des solutions palliatives fondées sur des technologies industrielles (*cf.* chapitre *1.3. Adaptation au changement climatique*).
Résidentiel	
Logements neufs	• **Volume de construction de logements neufs**. Le nombre annuel de logements construits recule. Le besoin en logements baisse, du fait du ralentissement de la croissance démographique. C'est la décohabitation liée au vieillissement qui est le facteur majeur de demande. On répond à ce besoin par la construction neuve et par la résorption de la vacance en zone tendue. • **Typologie des logements neufs**. Le type de logements construits varie peu (les maisons individuelles continuent à représenter une part importante de la construction neuve). • **Qualité thermique**. Accélération de l'amélioration des performances énergétiques des logements. Les logements construits atteignent au moins un niveau BEPAS ou BEPAS+ à partir de 2030. Dans les années 2040-2050, l'ensemble des logements construits sont à un niveau BEPAS+. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Fioul et gaz disparaissent au profit des chauffe-eau thermodynamiques, mais également de la PAC multisources, de la récupération de chaleur (par exemple sur eaux usées). Développement du solaire combiné. • **Équipements et énergie de chauffage**. Arrêt du gaz au profit des EnR électriques (pompes à chaleur). • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. Augmentation de l'équipement des logements neufs en pompes à chaleur réversibles, sous l'influence de la RE2020.
Logements existants	• **Politique de rénovation énergétique des logements**. La politique de rénovation repose sur l'industrialisation de la rénovation. Le ciblage de la politique se fait en fonction des caractéristiques architecturales des bâtiments. Les rénovations énergétiques performantes (*i.e.* permettant d'atteindre au moins les critères du label BBC Rénovation 2009) se développent sur le segment du parc où il est possible d'industrialiser la rénovation puis, au fur et à mesure, sur des segments architecturaux plus difficiles à industrialiser en première période. Les rénovations par geste, sans inscription dans une trajectoire de performance restent majoritaires pour le parc dont il n'est pas possible d'industrialiser la rénovation. Le rythme de rénovation augmente de façon significative. En 2050, une partie du parc a fait l'objet d'une rénovation *via* des procédés industrialisés, le reste du parc ayant au moins renouvelé ses équipements, mais sans inscription dans une trajectoire de performance. • **Besoins et qualité thermique**. Le besoin évolue de manière contrastée dans le parc : il diminue très fortement du fait de la rénovation thermique pour les logements faisant l'objet d'une rénovation ambitieuse. Dans le reste du parc, il suit une évolution tendancielle : à la baisse pour le besoin de chaud, à la hausse pour l'eau chaude sanitaire et le froid. • **Équipements et énergies de chauffage**. L'accent est mis sur le déploiement d'innovations technologiques, notamment sur le segment du parc rénové. Les innovations d'aujourd'hui deviennent la norme (ex. : pompes à chaleur fonctionnant à haute température adaptées à la rénovation des bâtiments difficilement isolables, systèmes de production d'eau chaude associant récupération et pompe à chaleur, système de ventilation régulé en fonction de la qualité de l'air, poêles connectés…). Le changement d'énergie s'accélère, sous l'effet du rythme de rénovation, qui vient s'ajouter au remplacement des équipements en fin de vie. Il est cependant moins important que dans les autres scénarios, la rénovation ne concernant qu'une partie du parc. Poursuite de la tendance à la baisse du fioul, qui devient résiduel en 2050 et à l'électrification du chauffage (*via* les pompes à chaleur). Le gaz continue à être utilisé, notamment avec des PAC hybrides permettant de répondre à un besoin plus important et de gérer la pointe du réseau électrique. Le nombre de logements raccordés au réseau gaz est maintenu constant. • **Équipements et énergies d'eau chaude sanitaire**. Pour les systèmes non combinés, développement d'innovations technologiques permettant une forte augmentation des rendements. • **Équipements et énergies de rafraîchissement**. La climatisation se généralise. Le parc se retrouve scindé entre une partie rénovée de façon ambitieuse, sur laquelle de nouvelles technologies très efficaces et des PAC se développent, et une partie qui suit le scénario tendanciel de rénovation, où ce sont les climatiseurs mobiles et monosplits qui se développent.

Suite page suivante

Vie quotidienne	• **Volume d'eau chaude sanitaire par personne**. Le besoin augmente d'environ 30 %. • **Température de consigne de chauffage**. La température de consigne moyenne n'évolue pas. • **Produits blancs**. Les usages progressent dans une logique de rattrapage d'un mode de vie « à l'américaine » : plus d'équipements, plus grands et connectés., multi-équipement. Les équipements permettent par exemple de gérer le gaspillage (information quand le produit arrive à péremption, liste de courses automatique…). Cela annule une partie importante des gains d'efficacité énergétique qui sont réalisés sur les appareils, si bien que la consommation globale ne baisse que lentement. • **Produits bruns et gris**. Développement de la *Smart Home* et de l'Internet des objets. Le logement s'équipe de nouveaux objets connectés et d'écrans dans toutes les pièces. Les loisirs poursuivent leur numérisation (réalité augmentée…). Développement des usages dans le domaine de la santé, de l'autonomie des personnes âgées… La réparabilité augmente, mais les effets de mode entraînent une forte obsolescence. • **Éclairage**. L'éclairage devient le pivot de la maison intelligente en permettant le transfert de données entre appareils et en suivant l'usager. L'éclairage est partout. Le vieillissement de la population entraîne des besoins nouveaux, notamment en appareils dont la communication passe par l'éclairage. L'éclairage est un signe extérieur de richesse et utilisé pour mettre en valeur sa maison ou son jardin. • **Cuisson**. Ce scénario se caractérise par une forte croissance des plats déjà préparés (livrés ou achetés) qui ne nécessitent qu'un réchauffage. On peut même imaginer dans certains logements la fonction « cuisine » qui disparaît, en réponse à une partie des attentes de la population (ne resterait que le réchauffage). Il s'ensuit une baisse de l'usage des appareils de cuisson traditionnels et un usage accru de petits appareils spécialisés (micro-ondes, robots, plaques de chaud et froid intégrées dans les table à manger, etc.). Dans le logement connecté, les équipements deviennent des aides cuisiniers : ils répondent à la commande vocale, proposent des recettes et conseils et gèrent la cuisson. Les progrès d'efficacité sont contrebalancés par les consommations en veille. Au final, ces tendances parfois contradictoires conduisent à une relative stabilisation des consommations globales de la cuisine.
Tertiaire	
Bureaux	Dans un contexte où l'entreprise comme lieu physique perd de sa centralité, et où le nomadisme se développe, les bureaux deviennent plus denses, au cœur des métropoles, dans les grands pôles d'immobilier de bureau historiques (Île-de-France, grandes métropoles régionales). Les locaux des entreprises sont adaptés pour accueillir moins de travailleurs à temps plein, et plus d'activités d'échanges (salles de réunion, lieux de convivialité). Le niveau de service augmente (restauration, conciergerie, services à la personne…). L'intensité d'usage des locaux n'augmente pas, la logique étant que la spécialisation des espaces permet d'en optimiser le confort d'usage. L'obsolescence du bâti est gérée par une déconstruction-reconstruction d'ampleur.
Cafés-hôtels-restaurants	Un scénario similaire au scénario tendanciel où les innovations technologiques (espaces climatisés, stations de ski fonctionnant grâce aux technologies permettant de fabriquer de la neige artificielle et aux expériences virtuelles…) permettent de nouveaux voyages ou de compenser les impacts du changement climatique.
Commerces	La consommation de biens reste au cœur de la société. Cependant, dans une société vieillissante et de plus en plus préoccupée par l'environnement, les postes arrivés à maturité ces dernières années (habillement, équipements de la maison…) ne progressent plus. Quelques « poches » de consommation maintiennent une croissance (TIC…). Les canaux du commerce évoluent drastiquement : le e-commerce devient le canal principal et marginalise les magasins physiques.
Enseignement-recherche	Les établissements d'enseignement sont de plus en plus spacieux. Ils se spécialisent sur leur fonction d'enseignement.
Santé	Les besoins en bâtiments de santé suivent les évolutions démographiques, sur le même rythme que par le passé, sans attention particulière à limiter la surface par personne. La numérisation des établissements de santé se poursuit. Les établissements médicaux développent de nouveaux services (vastes zones d'accueil et de réception, magasins, restaurants, jardins paysagers…). La gestion de l'obsolescence se fait par déconstruction/reconstruction en priorité, puis par le changement d'usage et la rénovation.
Habitat communautaire	L'habitat communautaire se développe pour répondre aux besoins liés au vieillissement de la population, aux besoins des étudiants et des personnes en difficulté sociale. Les services offerts tirent à la hausse les consommations d'énergie (domotique, objets connectés…).
Sports, loisirs, culture	Les activités du temps libre se développent, portées par l'essor du numérique, la croissance du pouvoir d'achat, du temps libre des ménages, et le vieillissement de la population. Elles évoluent sans attention particulière à leur impact environnemental. Elles se tournent résolument vers le numérique. Les espaces évoluent pour accueillir ces nouvelles pratiques virtuelles. Les loisirs se déroulent en grande partie en intérieur. La recherche du confort oriente vers la multiplication d'espaces spécialisés (salle de concert + salle d'expo dans deux lieux séparés plutôt qu'espace culturel pouvant accueillir un concert un jour, une expo le lendemain…).
Data centers	La digitalisation de l'économie et la numérisation des process entraînent un accroissement sans précédent des consommations énergétiques dues à une croissance très importante du volume de données hébergées. L'efficacité énergétique s'accroît rapidement, mais sans pouvoir compenser la hausse du volume de données. • **Volume de données**. La croissance de volume de données des petits data centers (5G, Internet des objets…) reste tendancielle jusqu'à 2025. À partir de 2026, elle augmente de 10 % par rapport au tendanciel pour rester à 60 % jusqu'à 2028. Le rythme décroît ensuite progressivement jusqu'à 25 % en 2050. La croissance du volume de données des gros data centers (hyperscale, gros hébergeurs) est égale au tendanciel jusqu'en 2050. • **Type de data centers**. Multiplication des data centers, sans optimisation de la gestion des flux de données pour les orienter vers le data center le plus proche. • **Efficacité énergétique de la partie informatique**. L'efficacité des petits data centers croît de 13 % par an jusqu'en 2035 puis de 15 % par an de 2036 à 2050. Celle des gros data centers suit la même logique et augmente de façon similaire au scénario tendanciel jusqu'en 2035 puis accélère à 15 % par an jusqu'en 2050. • ***Power Usage Effectiveness* (PUE)**. Le PUE des petits data centers est de 2,10 en 2020 et diminue de 3 % tous les ans jusqu'à atteindre un palier de 1,02 en 2044 (= 1,15). Le PUE des gros data centers est de 1,80 en 2020 et diminue de 3 % par an tous les ans pour atteindre le palier de 1,02 à partir de 2039.

5.5.3. Dynamique du parc

RÉSIDENTIEL

En 2050, le parc de logements est constitué de 34 millions de résidences principales, auxquelles viennent s'ajouter 7 millions de résidences secondaires et logements vacants. **Au total, 29 % du parc de résidences principales (soit 10 millions de logements) a été construit après 2015.** En moyenne, 282 000 logements sont construits par an entre 2015 et 2050. Le rythme de construction décroît : il atteint une moyenne de 180 000 logements par an sur la période 2040-2050. Environ 91 000 logements sont détruits par an en moyenne.

En 2050, 99 % des logements existants en 2015 et non démolis ont fait l'objet d'une rénovation énergétique, plus ou moins marquée. **Parmi ceux-là, 41 % ont été rénovés à un niveau BBC Rénovation ou plus**, 9 % ont fait l'objet d'une rénovation touchant l'ensemble des postes de travaux mais sans inscription dans une trajectoire de performance et 50 % ont été rénovés seulement en partie. En moyenne, 228 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 187 000 permettant d'atteindre le niveau BBC ou plus (passif). **Le rythme de rénovation reste constant sur l'ensemble de la période**.

TERTIAIRE

L'évolution du parc bâti de ce scénario est similaire à celle du scénario tendanciel.

5.5.4. Consommation d'énergie

CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS L'INDUSTRIE

La consommation d'énergie finale liée à la demande du secteur du bâtiment (imports inclus, exports exclus) décroît. Elle passe de 52 TWhEF en 2014 à **32 TWhEF en 2050**. La production d'acier représente la majeure partie des consommations (37 %) (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR LES CHANTIERS

La consommation d'énergie pour les chantiers baisse de façon continue et très importante sur l'ensemble de la période. Elle passe de 11 TWhEF en 2015 à 6 TWh en 2050 (soit - 44 % entre 2015 et 2050). Les gains très importants en efficacité énergétique (liés notamment à la préfabrication), combinés à un ralentissement structurel de la construction neuve, permettent de contrebalancer le développement de la rénovation.

CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS

RÉSIDENTIEL

Le parc de logements consomme au total **356 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**, dont 234 TWhEF$_{PCI}$ pour la consommation des résidences principales (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement). La consommation d'énergie du résidentiel (hors chaleur EnR puisée dans l'environnement) baisse de 46 % par rapport à 2015. Le chauffage y est l'usage prépondérant et il repose sur le recours au gaz, puis à l'électricité et au bois. Il est suivi de la consommation des équipements blancs et bruns, dont la consommation s'élève à 1,8 MWh/logement en 2050 (contre 1,9 en 2015). La consommation d'énergie pour l'éclairage baisse, celle pour la climatisation augmente.

Les consommations de fioul domestique, de bois et de gaz baissent. La consommation d'électricité se maintient à un niveau similaire à celui de 2015. Les consommations de solaire thermique se développent.

Tableau 36 Scénario 4 – consommation du résidentiel en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Résidences principales				Résidences secondaires et logements vacants	Total résidentiel	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
234	110	3	347	11	358	- 2	356

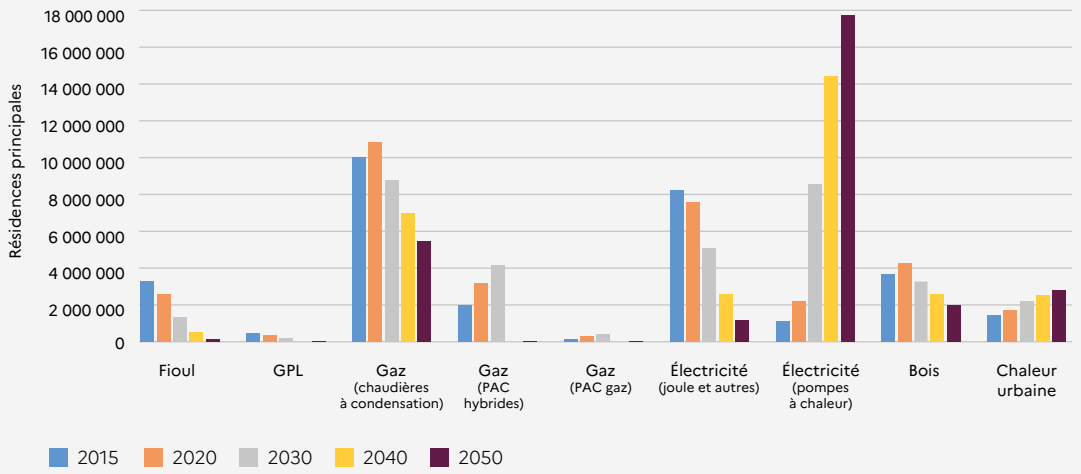
Tableau 37 Scénario 4 – consommation énergétique par usages dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	300	269	199	150	113
Eau chaude sanitaire (ECS)	48	43	31	25	21
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	12	61	96	113
Équipements	70	68	71	75	79
Éclairage	8	3	3	3	4
Climatisation	2	4	6	8	8
Ventilation	6	6	7	7	7
Auxiliaires	1	1	1	1	1
TOTAL	**442**	**406**	**380**	**366**	**347**

Tableau 38 Scénario 4 – consommation énergétique par vecteur dans les résidences principales ($TWhEF_{PCI}$)

	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Chaleur urbaine	16	17	18	18	17	+ 2 %
Réseau de gaz	140	129	96	71	52	- 63 %
Fioul domestique	53	39	15	6	2	- 96 %
Bois	77	69	40	24	16	- 79 %
Électricité (dont consommation des PAC)	142	135	147	150	147	+ 3 %
GPL	7	5	2	1	0	- 93 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**436**	**395**	**319**	**270**	**234**	**- 46 %**
Solaire thermique	1	1	2	2	3	+ 216 %
Chaleur EnR puisée par les PAC	5	11	59	94	110	+ 1 913 %
TOTAL	**442**	**406**	**380**	**366**	**347**	**- 21 %**

Graphique 5 Scénario 4 – nombre de résidences principales par équipement de chauffage



TERTIAIRE

La consommation d'énergie du secteur tertiaire s'établit à **254 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**. Comme dans le scénario tendanciel, cette consommation résulte d'une baisse de la consommation des branches CEREN que vient contrebalancer une très forte augmentation des consommations liées aux data centers hébergeurs. Celles-ci atteignent 29TWh en 2050. 62 % du parc de 2015 est rénové, soit 540 millions m² (surfaces chauffées). La consommation des branches CEREN s'établit à **175 TWhEF$_{PCI}$ en 2050**.

L'analyse de la consommation des branches CEREN montre une baisse des consommations liées au chauffage et à l'eau chaude sanitaire, mais une stabilisation des consommations de climatisation autour de 18TWh. Cela est dû à la combinaison d'un plus fort taux d'équipement et d'un déclenchement de la climatisation par les utilisateurs à des températures assez basses. Cela contribue à tirer les consommations vers le haut et ce malgré un important recours à des technologies très innovantes.

Au final, la consommation unitaire moyenne de ces branches s'établit à **155 KWhEF$_{PCI}$/m²** (surface chauffée) en 2050 (contre 231 KWhEF$_{PCI}$/m² en 2015). Là encore, l'évolution est similaire à celle du scénario tendanciel.

Le mix énergétique du chauffage et de l'eau chaude sanitaire reste dominé par le gaz (48 %), suivi de l'électricité (28 %). Le fioul domestique est encore présent en 2050 de manière résiduelle.

Tableau 39 Scénario 4 – consommation du tertiaire en 2050 ($TWhEF_{PCI}$)

Secteurs CEREN				Secteurs hors CEREN	Total tertiaire	Correction post-modèle	Total intégré au bilan
Consommation hors chaleur EnR puisée par les PAC et le solaire thermique	Chaleur EnR puisée par les PAC	Chaleur EnR puisée par le solaire thermique	Total				
174	25	1	200	52	252	2	254

Tableau 40 Scénario 4 – évolution de la consommation énergétique par usage dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050
Chauffage	102	98	76	66	59
Eau Chaude Sanitaire (ECS)	21	22	22	23	23
Chauffage et ECS (chaleur EnR puisée dans l'environnement)	6	8	21	25	26
Autres usages thermiques	11	11	11	10	9
Équipements (électricité spécifique et éclairage)	59	60	57	56	55
Cuisson	11	11	10	10	9
Climatisation	19	13	13	15	18
TOTAL branches CEREN	**229**	**224**	**210**	**205**	**200**
Hors CEREN	31	31	30	37	52
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**240**	**242**	**252**

Tableau 41 Scénario 4 – évolution de la consommation d'énergie par vecteur dans le tertiaire ($TWhEF_{PCI}$)

Usage	2015	2020	2030	2040	2050	Variation 2050/2015
Secteurs CEREN						
Chaleur urbaine	9	9	9	10	11	+ 14 %
Réseau de gaz	71	69	58	52	47	- 34 %
Fioul domestique	28	25	13	9	5	- 83 %
Bois	1	2	2	2	2	+ 53 %
Électricité dont consommation des PAC)	109	107	103	105	108	- 1 %
GPL	4	4	3	2	2	- 59 %
TOTAL (hors chaleur EnR)	**222**	**216**	**190**	**180**	**174**	**- 22 %**
Solaire thermique	0	0	0	1	1	
Chaleur EnR puisée par les PAC	6	8	21	24	25	+ 335 %
TOTAL secteurs CEREN	**228**	**224**	**210**	**205**	**200**	**- 12 %**
Secteurs hors CEREN (électricité)	31	31	30	37	52	+ 66 %
TOTAL tertiaire	**260**	**255**	**240**	**242**	**252**	**- 3 %**

5.5.5. Émissions de GES

ÉMISSIONS DE GES POUR L'USAGE DES BÂTIMENTS[26]

Les émissions de GES liées à la combustion dans le bâtiment passent de 70 $MtCO_2eq$ en 2015 à **15 $MtCO_2eq$ en 2050**. L'évolution à la baisse du contenu carbone des réseaux permet également d'obtenir une baisse des émissions liées à la production d'électricité et réseaux de chaleur alimentant les bâtiments, qui s'établissent à 2,1 $MtCO_2eq$ en 2050.

STOCKAGE DE CO_2 DANS LES MATÉRIAUX

Le stockage de CO_2 dans les matériaux de construction s'élève à **3,4 $MtCO_2$/an en 2050** (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

5.5.6. Consommation de ressources

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA CONSTRUCTION NEUVE

La consommation de matériaux pour la construction s'élève, en cumulé entre 2015 et 2050, à :

- **1 150 Mt pour la construction de logements neufs** (EHPAD inclus) ;
- **160 Mt pour les bâtiments tertiaires** de grandes surfaces commerciales, d'hôtel, d'enseignement et de bureau.

Ce sont encore les granulats qui représentent le volume le plus important (551 Mt), suivis par le sable (425 Mt) et le ciment (135 Mt) (*cf.* *Tableau 46* pour le détail des matériaux consommés). **On observe une augmentation de 60 % des consommations d'isolants biosourcés** (dont les fibres et laines de bois) **entre 2015 et 2050** (48 kt par an en 2050 contre 30 kt en 2015). Leur tonnage est évalué à 1,5 Mt en cumulé entre 2015 et 2050, soit environ 22 % du total des consommations d'isolants.

Ce volume cumulé traduit :

- **une division par deux des consommations de matériaux pour le résidentiel entre 2015 et 2050** (20 Mt pour l'année 2050 contre 43 Mt en 2015) ;
- **une division par près de trois des consommations pour le tertiaire (CHEB) entre 2015 et 2050** (2,85 Mt pour l'année 2050 contre 8 Mt en 2015).

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la construction de l'ensemble des bâtiments** (résidentiels, tertiaires, industriels et de stockage, agricoles) **baisse de 33 % par rapport à 2015**, du fait en particulier de parts de modes constructifs très réduites par rapport aux autres scénarios (comprises entre 10 % et 20 % seulement suivant le type de bâtiment et l'usage). La consommation de bois évolue ainsi de 1,7 Mm^3 en 2015 à 2,1 Mm^3 en 2035 (38 % feuillus, 62 % résineux) et à 1,1 Mm^3 en 2050 (45 % feuillus, 55 % résineux) (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* pour les ressources disponibles pour chaque scénario).

CONSOMMATION DE MATÉRIAUX POUR LA RÉNOVATION

Les travaux relatifs à la rénovation énergétique BBC des logements construits après 2012 (donc non soumis à la RT 2012) **requièrent, en cumulé entre 2015 et 2050, 32 Mt de matériaux** (*cf.* *Tableau 47* pour le détail des matériaux). Les isolants biosourcés représentent 30 % du volume d'isolants utilisés entre 2015 et 2050 (soit 2 Mt).

La consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) **pour la rénovation** (énergétique et non énergétique) **de l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires augmente**, pour passer de 2,5 Mm^3 en 2015 à 3,2 Mm^3 en 2035 (30 % feuillus, 70 % résineux) et **3,7 Mm^3 en 2050** (40 % feuillus, 60 % résineux). Pour les bâtiments industriels, de stockage et agricoles, cette consommation est considérée comme négligeable.

PRODUCTION DE DÉCHETS LIÉE À L'ACTIVITÉ DU BÂTIMENT

Les déchets du bâtiment s'orientent légèrement à la baisse du fait du ralentissement structurel de la construction neuve. Ils passent de 42 Mt en 2015 à 39 Mt en 2050. Le réemploi se développe pour atteindre **3,9 Mt en 2050**, soit 10 % du volume de déchets généré par le bâtiment (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*).

Les déchets liés à la rénovation BBC des logements constituent une fraction des déchets du bâtiment. En cumulé sur la période 2015-2050, ils représentent 6,8 Mt pour les matériaux retirés et les chutes de mise en œuvre (*cf.* *Tableau 50* pour le détail des matériaux). La rénovation entraîne la dépose de 80,5 millions de baies (bois et PVC) (*cf.* *Tableau 51* pour le détail des éléments déposés).

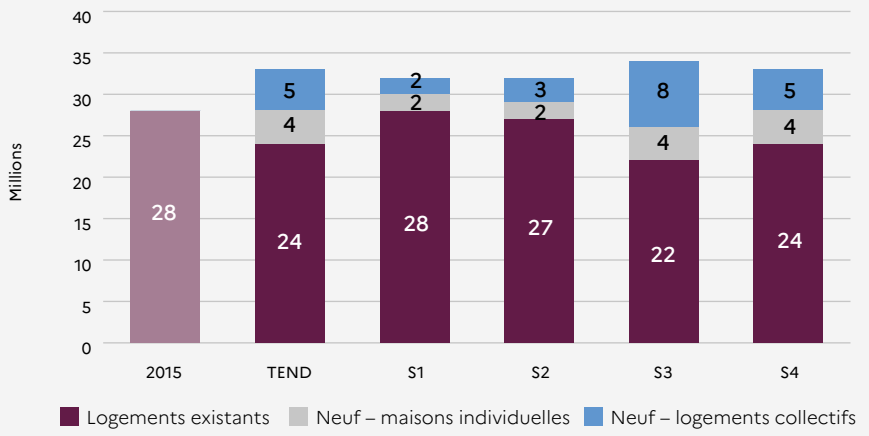
26 À la date de publication de ce rapport, les évaluations GES réalisées dans ce chapitre sectoriel n'ont pas pu prendre en compte les derniers bouclages concernant les facteurs d'émissions des vecteurs gaz et électricité, en raison des interactions entre ces vecteurs. Ces modifications seraient de second ordre et ne modifient pas les grandes conclusions de ce chapitre.

5.6. Comparaison des 4 scénarios

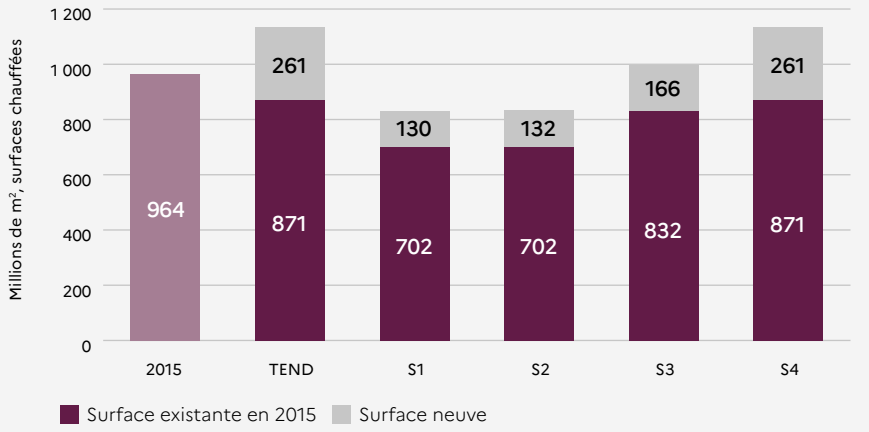
5.6.1. Parc bâti et construction neuve

Les scénarios 1 et 2 sont ceux où le volume du parc bâti en 2050 est le moins important. Le nombre de résidences principales dans ces scénarios est d'environ 2 millions de moins que dans les autres, grâce à une plus grande cohabitation (plus de personnes par ménage). La surface tertiaire globale y diminue également, *via* des changements/mutualisations d'usage. C'est dans S3 que la proportion de logements neufs dans le parc est la plus importante. Dans le tertiaire, la métropolisation conduit néanmoins à limiter les surfaces neuves dans ce scénario.

Graphique 6 Parc de résidences principales en 2050 dans tous les scénarios



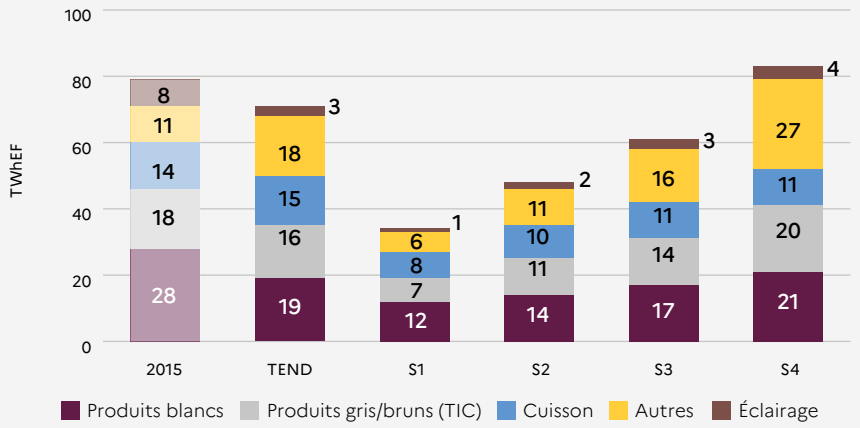
Graphique 7 Parc tertiaire en 2050 (branches CEREN) dans tous les scénarios



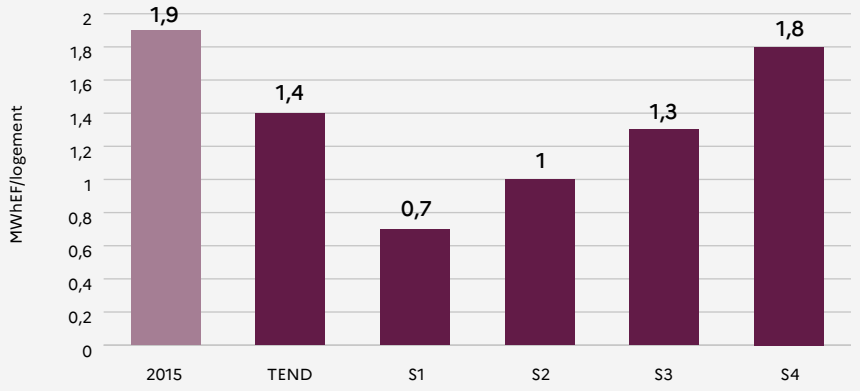
5.6.2. Consommation d'énergie pour la vie quotidienne dans les logements

La consommation d'énergie liée à la vie quotidienne[27] dans les logements varie du simple au double entre S1 et S4. **Dans S1, l'activation conjointe des leviers de sobriété et d'efficacité permet de diminuer de moitié la consommation par rapport à 2015**. Dans S3, l'effet des efforts technologiques d'efficacité importants sur les appareils est en partie annihilé par la poursuite de modes de vie très consommateurs d'énergie. Par exemple, la consommation des produits blancs (lave-linge, réfrigérateurs…) recule de seulement 2 TWh en 2050 par rapport au scénario tendanciel. Par ailleurs, de nouveaux équipements pourraient apparaître dans le futur, comme ils l'ont fait par le passé. **Ces nouveaux usages et appareils divers (représentés par la catégorie « Autres ») sont également centraux dans l'évolution des consommations de ce secteur** : si dans S1 et S2 les efforts de sobriété limitent la multiplication de ces usages divers et inédits, ils sont en très forte croissance dans S4.

Graphique 8 Consommation usages spécifiques (électricité et gaz) en 2050 par grande catégorie d'équipement dans tous les scénarios



Graphique 9 Consommation unitaire d'électricité spécifique par résidence principale en 2050 dans tous les scénarios

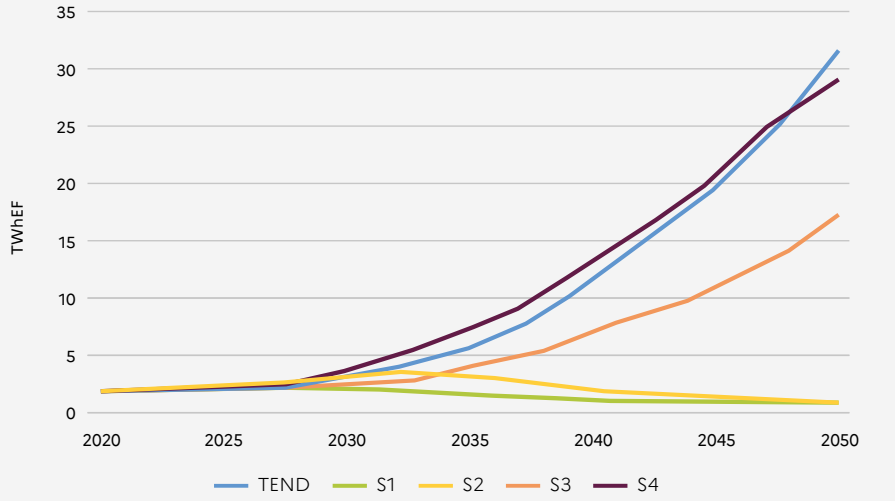


27 Usages dits spécifique, hors usages thermiques.

5.6.3. Consommation énergétique des data centers hébergeurs

Les consommations des data centers varient très fortement d'un scénario à l'autre. Le scénario tendanciel, qui prévoit une forte croissance des données traitées, conduit à une croissance exponentielle de la consommation, avec une multiplication par 16 entre 2020 et 2050 et ce malgré la progression de l'efficacité énergétique. Des progrès très importants d'efficacité énergétique permettent de limiter la croissance de la consommation dans S3. Dans S4, ils sont contrebalancés par une augmentation importante du volume de données avec l'explosion des usages du numérique et l'externalisation des systèmes d'information des entreprises. **Seuls S1 et S2, qui tablent sur un tassement de la croissance des données traitées par les petits data centers, contiennent la consommation à un niveau similaire à celui des années 2020**. Ce tassement est le signe de la prise de conscience par tous, des enjeux environnementaux et l'adoption d'un usage plus sobre du numérique.

Graphique 10 Consommation des data centers hébergeurs dans tous les scénarios



5.6.4. Rénovation énergétique du bâti existant

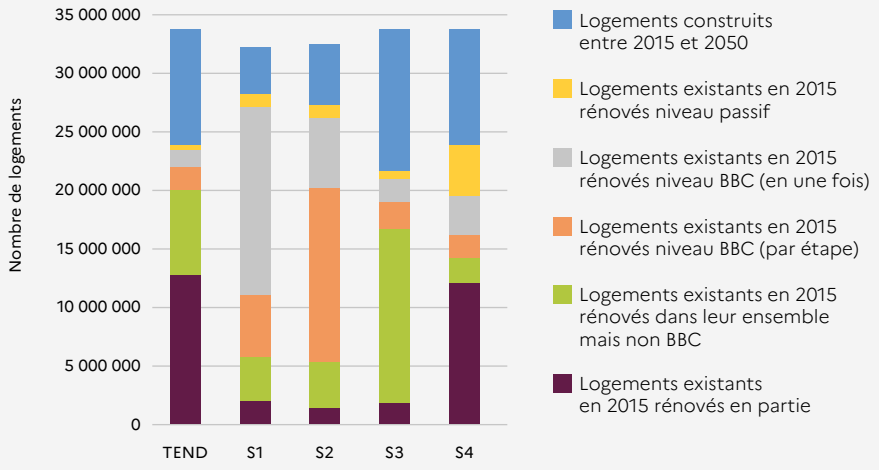
Les scénarios sont contrastés au regard de l'ampleur et des modalités de rénovation. Dans le résidentiel, S1, S2 et S3 mènent tous les trois à un parc de 2050 où la quasi-totalité (autour de 90 %) des logements existants en 2015 ont été rénovés. Ils se distinguent par :

- le nombre de rénovations : il est plus élevé dans S1 et S2, car ce sont ceux dans lesquels la proportion de logements existants en 2015 et encore présents en 2050 est la plus élevée (du fait du réinvestissement des résidences secondaires et des logements vacants). Près de 22 millions de logements font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe dans S1 et S2, contre 18 dans S3 ;
- la nature de ces rénovations : majoritairement des rénovations permettant d'atteindre le niveau BBC Rénovation en une fois dans S1, des rénovations BBC par étape dans S2 et rénovation de l'ensemble de l'enveloppe, mais sans inscription dans une trajectoire de performance, et donc ne permettant pas d'atteindre le niveau BBC Rénovation dans S3.

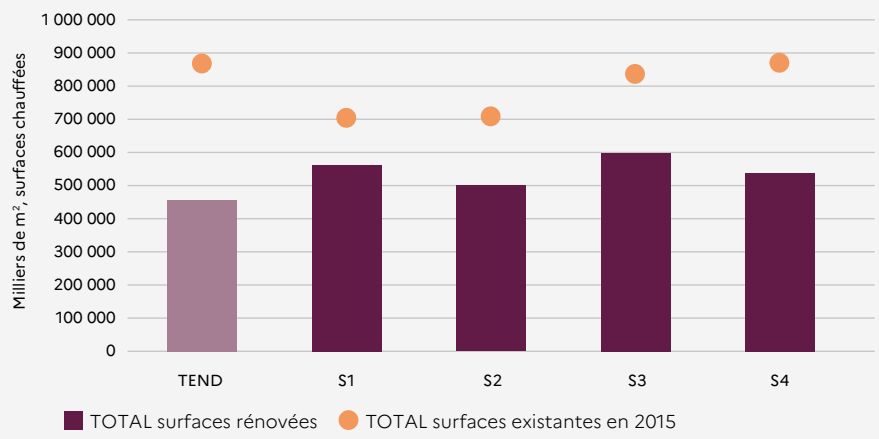
Le scénario 4 présente une image à 2050 très différente, plus proche du scénario tendanciel. Seule la moitié du parc de logements existants en 2015 a fait l'objet d'une rénovation de l'ensemble de son enveloppe. Il se distingue néanmoins du scénario tendanciel par le fait que cette rénovation est bien plus efficace. Ainsi, le nombre de logements rénovés à un niveau passif ou BBC dans S4 représente plus du double du scénario tendanciel.

Dans le tertiaire, S1 est celui dans lequel la proportion de parc rénovée est la plus importante (80 % contre 62 % dans S4). Cependant, **c'est S3 qui représente le volume global de surfaces tertiaires rénovées le plus important** (près de 600 millions de m², surface chauffée).

Graphique 11 Parc de résidences principales en 2050 – répartition par niveau de performance énergétique dans tous les scénarios (nombre de logements)



Graphique 12 Surfaces tertiaires rénovées en 2050 dans tous les scénarios (branches CEREN)



5.6.5. Consommation d'énergie finale pour les besoins thermiques

Cette section présente les résultats des modélisations en énergie finale.

CHAUFFAGE

Dans le secteur résidentiel, la consommation d'énergie finale liée au chauffage et aux équipements associés (auxiliaires et ventilation) baisse significativement dans l'ensemble des scénarios par rapport au tendanciel sous l'effet de l'isolation du bâti et des changements d'équipements. Dans l'ensemble, malgré des stratégies très différentes dans chaque scénario, **les consommations de chauffage varient de moins de 10 % en énergie finale d'un scénario à l'autre** (ce constat est à nuancer en énergie primaire[28]).

- **C'est dans S1 que la consommation en énergie finale est la moins élevée** malgré le fait que le parc comporte en 2050 une partie plus importante de logements déjà existants en 2015 (et donc plus consommateurs en phase d'usage). C'est la conséquence du rythme très ambitieux de rénovations BBC en une fois, du fait qu'il y a moins de logements au total dans le parc et, dans une moindre mesure, de la baisse de la température de consigne moyenne.

- **S2 et S4 ont des consommations similaires en énergie finale, mais *via* des leviers différents** : isolation ambitieuse du bâti dans S2, électrification du chauffage, installation d'équipements à haut rendement (pompes à chaleur) et proportion importante de logements neufs (moins consommateurs en phase d'usage) dans S4.

- **S3 est celui qui a la consommation en énergie finale la plus importante** : cela est lié aux rénovations moins performantes sur le plan énergétique, que ne permet pas de contrebalancer la présence d'une forte proportion de logements neufs.

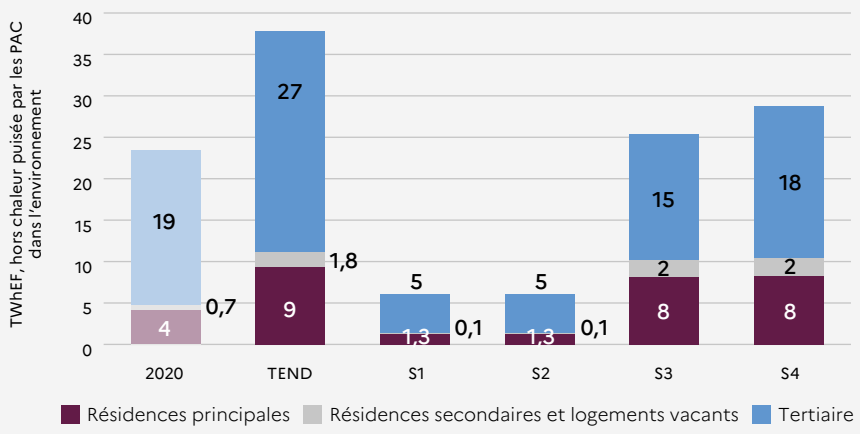
EAU CHAUDE SANITAIRE

La consommation d'énergie pour l'eau chaude sanitaire diminue fortement dans tous les scénarios, y compris le scénario tendanciel, sous l'effet du remplacement des équipements d'ici 2050. Le levier de l'efficacité joue ainsi pleinement. Les comportements de sobriété modélisés ici (à savoir la limitation de la consommation d'eau chaude) dans S1 et S2 ont peu d'incidence sur les consommations à 2050[29]. L'amélioration du calorifugeage du réseau permet à S4 d'être le moins consommateur en énergie finale.

CLIMATISATION

Les consommations de climatisation varient grandement d'un scénario à l'autre. Dans S1 et S2, la rénovation du bâti, des températures de consignes hautes (réglage de la température de consigne à 26 °C dans les logements) et le recours à des équipements efficaces (pompes à chaleur…) permettent de diminuer les consommations de 70 % par rapport à celles de 2020[30]. Dans S3 et S4, les gains en efficacité des équipements ainsi que le recours à des équipements efficaces permettent de compenser la hausse du recours à la climatisation et la moindre rénovation du bâti et, au final, de diminuer la consommation par rapport au scénario tendanciel.

Graphique 13 Consommation de climatisation en 2050 dans tous les scénarios



28 L'analyse en énergie primaire sera disponible ultérieurement.
29 Le modèle ANTONIO ne permet pas de faire varier la taille des chauffe-eaux, ce qui ne permet pas d'explorer ce levier.
30 Les données d'observation ayant été établies pour l'année 2020 pour la climatisation, c'est cette dernière qui sert d'année de référence pour cet usage.

5.6.6. Bilan de la consommation d'énergie finale pour l'usage des bâtiments

L'ensemble des scénarios, y compris le tendanciel, prévoit une réduction de la consommation d'énergie finale à 2050 *(Tableau 42)* pour l'usage des bâtiments (c'est-à-dire pour les faire fonctionner, donc sans prendre en compte l'énergie nécessaire à leur construction, leur rénovation ou leur démolition). C'est S1 qui conduit à la baisse la plus importante et S4 qui est le plus consommateur. La différence entre ces scénarios est de 171 $TWhEF_{PCI}$. **Le chauffage et l'eau chaude sanitaire restent les usages prépondérants en 2050 dans tous les scénarios, suivis par les équipements spécifiques**. Pour avoir une vision plus complète de la consommation énergétique liée à l'usage des bâtiments, il est cependant nécessaire de la regarder aussi en énergie primaire.

Tableau 42 Consommation d'énergie en 2050 par scénario ($TWhEF_{PCI}$)

	2015	TEND	S1	S2	S3	S4	Visions ADEME 2018	SNBC AMS 2019
Résidentiel								
Résidences principales	442	338	225	243	303	347	-	-
Résidences secondaires et logements vacants	15	9	2	4	9	11	-	-
Total résidentiel *avant ajustements post-modèle*	457	347	227	246	312	358	-	-
Total résidentiel *après ajustements post-modèle*	**462**	**349**	**228**	**247**	**312**	**356**	**287**	**291**
Tertiaire								
Branches CEREN	228	208	124	128	169	200	228	208
Tertiaire hors CEREN	31	54	22	22	39	52	31	54
Total tertiaire *avant ajustements post-modèle*	260	263	146	150	207	252	260	263
Total tertiaire *après ajustements post-modèle*	**271**	**266**	**146**	**149**	**207**	**254**	**271**	**266**
Total résidentiel et tertiaire *après ajustements post-modèle*	**725**	**614**	**374**	**396**	**519**	**610**	**453**	**461**

5.6.7. Vecteurs énergétiques

L'ensemble des scénarios, y compris le tendanciel, prévoit une baisse importante des consommations de fioul domestique et, à des degrés divers, de gaz réseau et de bois. La consommation d'électricité baisse dans S1, S2 et S3, sous l'effet à la fois des rénovations et, dans S1 et S2, des évolutions des pratiques énergétiques des occupants. Elle augmente dans S4.

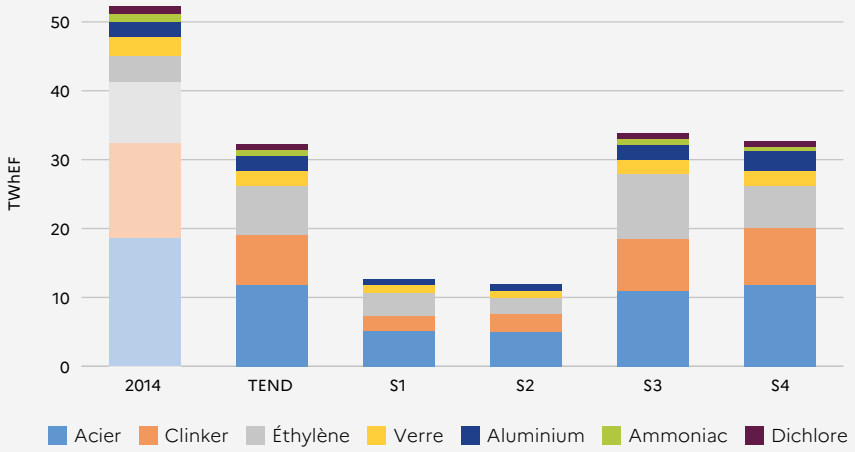
Tableau 43 Consommation du secteur bâtiment par vecteur énergétique en 2050 par scénario ($TWhEF_{PCI}$)

	2015	TEND	S1	S2	S3	S4
Chaleur urbaine	26	30	26	41	46	27
Réseau de gaz	214	133	29	45	58	101
Fioul domestique	83	7	0	0	0	7
Bois	78	43	66	55	44	18
Électricité (dont consommation des PAC)	290	313	177	188	262	315
GPL	11	2	1	1	1	2
Chaleur EnR puisée par les PAC	11	79	71	61	101	135
Solaire thermique	1	2	3	5	6	4
TOTAL *avant ajustements post-modèle*	716	609	373	396	519	610
TOTAL *après ajustements post-modèle*	**725**	**614**	**374**	**396**	**519**	**610**

5.6.8. Consommation d'énergie dans l'industrie liée à l'activité du bâtiment

Au-delà des consommations d'énergie liées à la phase d'usage des bâtiments, l'activité du bâtiment (construction, rénovation) a des impacts sur les consommations d'énergie dans l'industrie (production de matériaux et d'équipements). S3 et S4, dans lesquels la construction est plus importante, entraînent une consommation d'énergie des Industries Grandes Consommatrices d'Énergie (IGCE) de 2 à 3 fois supérieure à celles de S1 et S2. La plus grande efficacité énergétique dans S2 le rend moins consommateur que S1 et ce, alors que la demande adressée à l'industrie y est plus élevée. Le même phénomène est à l'œuvre pour S3 et S4. Dans S3, l'efficacité énergétique permet de contrebalancer l'augmentation de la demande adressée par le bâtiment à l'industrie (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

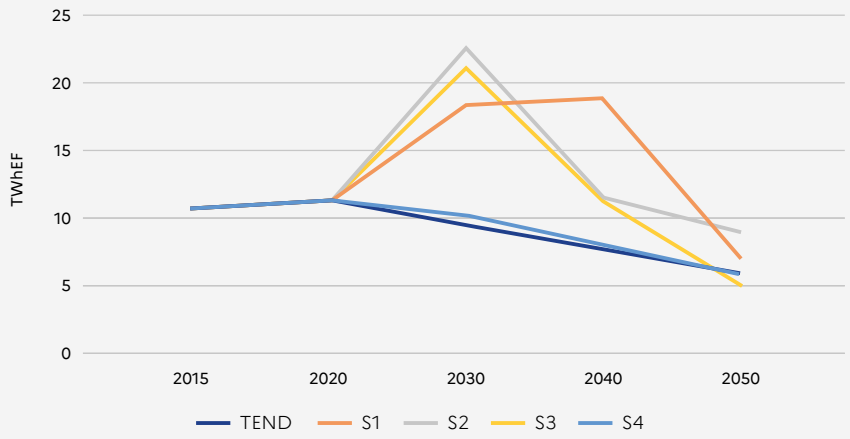
Graphique 14 Consommation énergétique des IGCE dans tous les scénarios pour fournir le secteur du bâtiment



5.6.9. Consommation d'énergie pour les chantiers

Les scénarios ont des dynamiques différentes de consommation d'énergie pour les chantiers. Les scénarios tendanciel et 4 suivent des tendances similaires, mais pour des raisons différentes. Alors que le scénario tendanciel s'oriente à la baisse, sous l'effet de gains d'efficacité énergétique et du ralentissement structurel de la construction neuve, c'est une augmentation importante de l'efficacité énergétique des chantiers qui permet à S4 de compenser une hausse des rénovations. **Dans S1 et S2, où on rénove le plus, la consommation s'oriente dans un premier temps à la hausse, la baisse de la construction neuve ne permettant pas de compenser le fort développement des réhabilitations.** Enfin, S3 cumule une forte rénovation et une très forte construction neuve.

Graphique 15 Évolution des consommations de chantier dans tous les scénarios



5.6.10 Émissions de GES

ÉMISSIONS DE GES LIÉES À L'USAGE DES BÂTIMENTS[31]

En 2050, les émissions de GES liées à l'usage des bâtiments sont également fortement contrastées, puisqu'elles s'échelonnent entre 3 $MtCO_2eq$ dans S1 et 17 $MtCO_2eq$ dans S4 si on prend en compte les émissions liées à la production d'électricité et de réseaux (chaleur et froid) alimentant les bâtiments. **Les scénarios 2 et 3 conduisent à des émissions de GES similaires avec deux stratégies différentes** : une plus grande isolation de l'enveloppe des bâtiments dans S2, une plus grande décarbonation des vecteurs dans S3. **Les scénarios 3 et 4 déplacent donc la responsabilité de l'action vers d'autres secteurs** (développement d'énergies peu impactantes pour l'environnement dans S3, puits de carbone dans S4).

Tableau 44 Émissions de GES en 2050 par scénario ($MtCO_2eq$)

	TEND	S1	S2	S3	S4	Visions ADEME 2018	SNBC AMS 2019
Émissions directes (scope 1)							
Résidentiel	15,1	0,9	1,1	1,2	7	8,2	-
Tertiaire	10,6	0,5	0,7	0,8	7,8	1,4	-
TOTAL émissions directes	**25,7**	**1,4**	**1,8**	**2**	**14,8**	**9,6**	**5**
Émissions indirectes (scope 2) liées à la production et à la transformation d'énergie – électricité et réseaux chaleur/froid							
Résidentiel	2,2	0,9	1	0,9	1,1	-	-
Tertiaire	2,2	1	0,9	1	1	-	-
TOTAL émissions indirectes	**4,4**	**1,9**	**1,9**	**1,9**	**2,1**	**-**	**-**
TOTAL	**30,1**	**3,3**	**3,7**	**3,9**	**16,9**	**-**	**-**

STOCKAGE DE CO_2 DANS LES MATÉRIAUX

Dans l'ensemble des scénarios, les produits bois contribuent de façon marginale aux puits naturels de carbone en 2050 (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

Tableau 45 Stockage carbone dans les produits bois en 2050 par scénario ($MtCO_2$/an)

	TEND	S1	S2	S3	S4
Produits bois	3,2	4,2	4,8	3,5	3,4
TOTAL puits naturels	**72**	**113**	**100**	**63**	**41**

31 À la date de publication de ce rapport, les évaluations GES réalisées dans ce chapitre sectoriel n'ont pas pu prendre en compte les derniers bouclages concernant les facteurs d'émissions des vecteurs gaz et électricité, en raison des interactions entre ces vecteurs. Ces modifications seraient de second ordre et ne modifient pas les grandes conclusions de ce chapitre.

5.6.11. Consommation de matériaux pour l'activité du bâtiment

CONSTRUCTION NEUVE

Les scénarios nécessitent des volumes de matériaux contrastés pour la construction neuve, reflétant ainsi les dynamiques de construction différenciées qui les caractérisent. **Les scénarios 3 et 4 engendrent les plus grandes consommations de matériaux**, soit entre 1 300 et 1 400 millions de tonnes en cumulé sur la période 2015-2050. C'est plus de deux fois la consommation de S1. Dans tous les scénarios, c'est le résidentiel qui entraîne la consommation de matériaux la plus importante.

Dans tous les scénarios, les consommations de granulats, de sable et de ciment restent très majoritaires, avec respectivement 42 %, 33 % et 10 % de la consommation totale. Les matériaux les plus utilisés sont ensuite le plâtre, la terre cuite, le bois et l'acier.

Tableau 46 Consommation par nature de matériaux pour la construction neuve (résidentiel et tertiaire – grandes surfaces commerciales, hôtel, enseignement et bureau) par scénario (milliers de tonnes cumulées entre 2015 et 2050)

	S1			S2			S3			S4		
	Résidentiel	Tertiaire CHEB	TOTAL	Résidentiel	Tertiaire CHEB	TOTAL	Résidentiel	Tertiaire CHEB	TOTAL	Résidentiel	Tertiaire CHEB	TOTAL
Ciment	53 716	13 554	67 270	69 349	12 676	82 025	132 815	14 665	147 480	117 166	18 080	135 246
Sable	169 475	40 616	210 091	218 193	37 904	256 097	418 049	43 769	461 818	370 316	54 079	424 396
Granulats	220 369	53 151	273 520	284 649	49 681	334 329	545 295	57 333	602 628	480 658	70 463	551 121
Acier	8 445	4 942	13 387	11 051	4 713	15 763	21 208	5 673	26 881	18 243	6 497	24 740
Verre	1 143	68	1 211	1 438	64	1 502	2 804	72	2 876	2 518	88	2 606
Plastiques alvéolaires	1 034	349	1 383	1 229	328	1 556	2 552	419	2 970	2 185	467	2 652
Autres plastiques	2 783	588	3 372	3 521	558	4 078	6 831	695	7 526	6 094	774	6 868
Laines minérales	1 065	339	1 404	1 211	325	1 536	2 394	370	2 763	2 311	458	2 769
Isolants biosourcés	528	1 943	2 471	930	1 875	2 805	1 627	1 622	3 249	1 412	1 881	3 293
Bois	11 592	774	12 366	14 868	708	15 576	29 907	644	30 551	25 865	701	26 566
Plâtre	16 526	9	16 535	21 279	8	21 287	41 675	9	41 684	36 299	5	36 305
Terre cuite	31 439	657	32 097	37 508	596	38 104	73 461	676	74 138	71 841	709	72 551
Sous-total	518 115	116 991	635 106	665 225	109 435	774 660	1 278 618	125 947	1 404 565	1 134 908	154 202	1 289 110
Autres matériaux	4 249	4 751	9 000	5 394	4 391	9 785	10 559	4 992	15 551	9 344	5 921	15 265
TOTAL	**522 365**	**121 742**	**644 106**	**670 619**	**113 826**	**784 445**	**1 289 177**	**130 939**	**1 420 116**	**1 144 252**	**160 123**	**1 304 375**

Pour les isolants biosourcés, les consommations varient en 2050 de 5 500 tonnes dans le scénario 1 à 59 000 tonnes dans le scénario 3 et ce malgré une part de ces matériaux dans S1 de deux à trois fois plus élevée que dans S3. Le faible volume de constructions neuves dans S1 en est la cause.

C'est le scénario 3 qui est le plus consommateur de bois (bois d'œuvre et panneaux) (2,5 Mm³ en 2050), alors que c'est dans S1 que l'utilisation des modes constructifs bois (*Cross Laminated Timber*, ossature bois, poteaux-poutres et systèmes mixtes) est la plus poussée. En effet, dans S1, ces modes représentent en 2050 de 37 % à 50 % des modes constructifs (suivant le type de bâtiment), contre 21 % à 34 % dans S3. Le fort taux d'utilisation des modes constructifs bois dans S1 est contrebalancé par un faible volume de constructions neuves. C'est S4 qui est le moins consommateur de bois (1,1 Mm³ en 2050).

RÉNOVATION BBC DU RÉSIDENTIEL

Les scénarios 1 et 2, dans lesquels la rénovation des logements est très dynamique et implique l'atteinte du niveau BBC Rénovation, sont ceux pour lesquels la consommation de matériaux pour la rénovation est la plus importante. Les 74 Mt à 75 Mt de matériaux nécessaires dans ces scénarios pour la rénovation BBC sont cependant à mettre en regard des 522 à 670 Mt nécessaires à la construction de logements dans ces scénarios (eux-mêmes peu constructeurs). **La rénovation énergétique d'ampleur permet ainsi de réduire drastiquement les consommations d'énergie des logements tout en requérant un volume modeste de matériaux.**

Le faible besoin dans S3 s'explique par le fait que la modélisation ne prend en compte que les rénovations BBC. Or, dans ce scénario, même s'il inclut une rénovation d'ampleur de l'enveloppe des logements, ceux-ci n'atteignent pas le BBC. Ainsi, ces résultats sous-estiment les matériaux nécessaires à la rénovation énergétique dans ce scénario.

Dans tous les scénarios, c'est la rénovation des maisons individuelles qui requiert le plus de matériaux. Elles représentent de 75 % à 85 % de la consommation de matériaux de rénovation BBC des logements.

Tableau 47 Consommation de matériaux pour la rénovation BBC des logements par application et nature de matériaux par scénario (milliers de tonnes, cumulé 2015-2050)

	S1	S2	S3	S4
Isolants				
Laines minérales	4 035	4 050	1 452	2 674
PSE/XPS	1 668	1 680	501	904
Isolants biosourcés	10 810	10 834	1 148	2 005
Autres isolants	1 856	1 895	799	1 071
Revêtements de murs				
Plâtre	6 980	6 990	1 725	3 120
Enduit	17 201	17 299	4 502	8 056
Autres matériaux				
Bois	4 068	4 150	1 000	1 840
Terre cuite	6 869	6 922	1 569	2 975
Verre	7 307	7 538	1 851	3 258
Béton	2 417	2 435	551	1 045
Ardoise	1 343	1 353	306	580
PVC	3 761	3 874	957	1 663
Acier	2 417	2 478	619	1 085
Alu	2 044	2 103	518	908
Autres matériaux	1 004	1 029	264	460
TOTAL	**73 781**	**74 632**	**17 762**	**31 645**

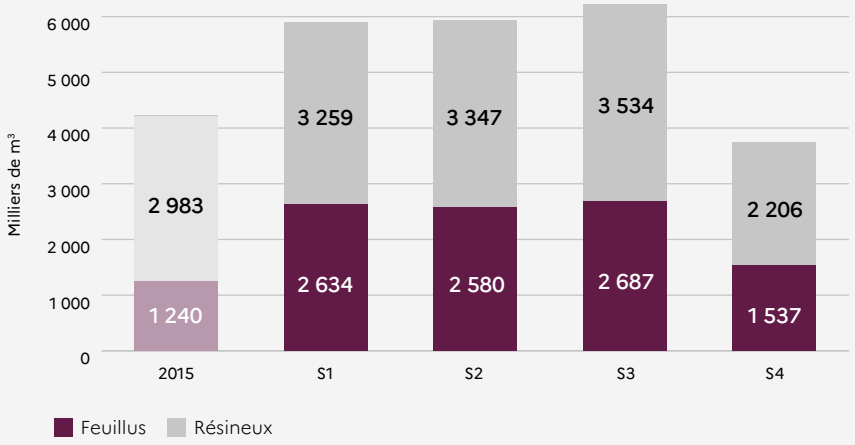
CONSOMMATION DE BOIS

À part dans S4, l'ensemble des scénarios prévoit une augmentation de la consommation de bois pour l'année 2050 pour l'ensemble des bâtiments (résidentiels, tertiaires, agricoles et industriels). C'est dans S3 que cette augmentation est la plus importante, les besoins de la construction, très forts dans ce scénario, s'additionnant à ceux de la rénovation. Dans S1 et S2, la consommation de bois est plutôt dans la rénovation (à la fois énergétique et non énergétique) au détriment de la construction.

Tableau 48 Consommation de bois en 2050, tous usages, tous bâtiments par scénario (milliers de m³)

	2015	S1	S2	S3	S4
Construction	**1 729**	**1 317**	**1 351**	**2 514**	**1 157**
Feuillus	242	804	750	1 204	502
Résineux	1 487	513	601	1 310	655
Rénovation (énergétique et non énergétique)	**2 494**	**4 576**	**4 576**	**3 707**	**2 586**
Feuillus	998	1 830	1 830	1 483	1 035
Résineux	1 496	2 746	2 746	2 224	1 551
TOTAL	**4 223**	**5 893**	**5 927**	**6 221**	**3 743**

Graphique 16 Consommation de bois (bois d'œuvre et panneaux) en 2050, tous usages, tous bâtiments par scénario



5.6.12. Production de déchets liée à l'activité du bâtiment

La production de déchets liée à l'activité du bâtiment varie faiblement entre les scénarios, sauf pour S3. Ce dernier, marqué par une forte déconstruction-reconstruction, est celui qui a l'empreinte déchets la plus importante, et ce, malgré un fort développement du réemploi (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*).

Tableau 49 Gisement de déchets par typologie de chantiers en 2050 par scénario (milliers de tonnes)

	2015	TEND	S1	S2	S3	S4
Démolition	21 000	21 000	21 000	21 000	42 000	21 000
Rénovation[32]	15 120	15 120	15 120	15 120	15 120	15 120
Neuf	5 460	3 125	539	1 075	2 970	3 133
TOTAL	**42 000**	**39 245**	**36 659**	**37 195**	**60 090**	**39 253**
Réemploi	550	3 925	3 666	3 719	12 018	3 925

Les déchets liés à la rénovation BBC des logements constituent une fraction des déchets du bâtiment dans l'ensemble des scénarios. Ce sont les scénarios 1 et 2 qui induisent la production de déchets la plus importante (les rénovations de l'ensemble de l'enveloppe n'étant pas BBC dans S3, les résultats présentés ici sous-estiment le volume de déchets produits par la rénovation énergétique dans ce scénario).

Les proportions de déchets produits sont similaires dans chaque scénario : les déchets minéraux représentent 65 %, le plâtre 25 % et les isolants un peu moins de 10 %. À ces tonnages, il faut ajouter ceux que représentent les éléments déposés. À titre illustratif, la dépose des baies dans S1 et S2 représente 3 200 kt de bois, 860 kt de PVC et 2 800 kt de verre.

Tableau 50 Chutes de mise en œuvre et matériaux retirés lors de la rénovation BBC des logements par scénario (milliers de tonnes cumulées 2015-2050)

	S1	S2	S3	S4
Terre cuite	6 651	6 707	1 534	2 898
Tuile béton	1 750	1 792	554	658
Ardoises	1 168	1 246	381	461
Plâtre	4 041	4 050	1 003	1 827
Enduit	862	867	145	404
PSE/PSX	132	132	39	69
Laines minérales	479	483	139	258
Isolants biosourcés	649	651	70	121
Autres isolants	115	110	49	107
Autres matériaux	89	90	23	41
TOTAL	**15 937**	**16 128**	**3 938**	**6 844**

32 En l'absence de données d'observation fiables sur la décomposition des déchets de rénovation, et étant donné que les déchets liés à la rénovation BBC n'en représentent qu'une fraction, il a été décidé de garder le volume de déchets de rénovation constant dans tous les scénarios.

Tableau 51 Éléments déposés lors de la rénovation BBC des logements par scénario (en cumulé 2015-2050)

	S1		S2		S3		S4	
	Nombre (milliers)	Surfaces (milliers m²)	Nombre (milliers)	Surfaces (milliers m²)	Nombre (milliers)	Surfaces (milliers m²)	Nombre (milliers)	Surfaces (milliers m²)
Baies								
Bois SV	127 404	194 663	128 139	195 944	35 080	54 862	59 666	91 923
Bois DV	4 031	9 502	4 256	1 033	1 417	3 341	1 981	4 674
PVC DV	49 400	74 018	48 166	78 919	9 909	14 848	18 868	28 265
TOTAL baies	**180 835**	**278 183**	**180 561**	**275 896**	**46 406**	**73 051**	**80 515**	**124 862**
Volets								
Volets battants	59 323	107 176	59 628	107 827	13 812	25 011	25 831	46 760
Volets roulants	36 223	71 878	38 135	76 094	9 298	18 712	15 768	31 466
Persiennes	37 943	71 032	39 552	74 533	10 608	20 022	17 496	32 738
TOTAL volets	**133 488**	**250 086**	**137 314**	**258 454**	**33 718**	**63 745**	**59 095**	**110 964**
Portes								
Bois	15 924	26 963	15 924	26 963	3 610	26 963	6 937	11 745
PVC	430	0	430	727	55	6 113	118	199
Portes palières	625	1 058	593	1 174	244	413	180	556
TOTAL portes	**16 979**	**28 021**	**16 947**	**28 864**	**3 909**	**33 583**	**7 235**	**12 500**

5.6.13. Émissions de polluants par les logements

En première analyse[33], **les émissions de particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$) liées à la combustion de fioul domestique, de gaz naturel, de bois et de GPL dans les logements s'orientent à la baisse dans l'ensemble des scénarios.**

Le bois reste de très loin, quel que soit le scénario considéré, la source principale contribuant aux émissions de particules du secteur. Ce sont donc les niveaux de consommations de bois ainsi que la part des granulés qui déterminent en premier lieu le niveau des émissions :

- **le scénario 4**, qui conjugue la plus forte baisse de la consommation de bois (- 79 % en 2050) et la plus forte proportion de granulés (72 % en 2050) **atteint la plus forte réduction de PM_{10} et de $PM_{2,5}$ en 2050 par rapport à 2015** ;
- **le scénario 1**, qui repose sur une consommation de bois plus importante (- 16 % seulement en 2050) et une moindre proportion de granulés (26 % en 2050) **est celui pour lequel la réduction d'émissions est la moins forte** ;
- **les scénarios tendanciel, 2 et 3 se situent entre ces deux extrémités.**

33 Comme indiqué dans la *section* Méthodologie, une analyse plus approfondie de l'impact des scénarios sur les polluants atmosphériques sera publiée dans un feuilleton spécifique.

6. Ne négliger aucun levier d'action

Les scénarios présentent des trajectoires mais ne sont pas assortis de propositions de politiques publiques précises. En effet, les modèles utilisés permettent de fixer des ordres de grandeur et de poser les jalons de trajectoires à 2050, mais ne sont pas explicites sur le mix d'instruments de politique publique associé (incitation, obligation…). De fait, pour un même objectif donné, il peut y avoir plusieurs combinaisons d'instruments efficaces. Le choix doit se faire en fonction de nombreux critères (faisabilité technique, économique, juridique, sociale, politique…) dont l'analyse est hors du périmètre de ce travail. Il nous permet néanmoins de formuler des recommandations pour une politique de transition écologique ambitieuse pour le bâtiment.

6.1. Accélérer dès maintenant

En déclinant les objectifs globaux (+ 1,5 °C) en objectifs spécifiques pour le bâtiment (rénovation, construction…), les scénarios fournissent des ordres de grandeur des changements nécessaires. Leur décalage par rapport au scénario tendanciel montre la nécessité d'accélérer dès maintenant la mise en place de la transition.

6.2. Agir sur chaque levier d'action

Ce travail a permis d'expliciter l'ensemble des leviers de transition connus à l'heure actuelle ainsi que de mettre en lumière le fait que **de nombreux leviers explorés dans ces scénarios, et notamment ceux de sobriété, ne sont couverts à l'heure actuelle par aucune politique publique**. On peut citer notamment l'évolution des pratiques énergétiques dans le logement (mutualisation des équipements, baisse du nombre d'équipements, des besoins en eau chaude…), mais aussi l'optimisation de l'occupation du parc existant (notamment les logements vacants) pour limiter la construction neuve.

Quatre axes de travail apparaissent centraux pour s'assurer de couvrir l'ensemble des leviers d'action :

- faire de la rénovation ambitieuse un axe de travail prioritaire : la rénovation occupe une place particulière et incontournable dans les scénarios. En effet, elle permet des gains rapides et beaucoup plus maîtrisables que d'autres leviers pour lesquels des politiques efficaces sont encore à trouver (on peut penser notamment à l'évolution des pratiques énergétiques quotidiennes des ménages). Par conséquent, une option efficace de gestion du risque de non atteinte des objectifs de neutralité carbone impliquerait d'aller le plus loin possible sur les sujets pour lesquels c'est possible. La rénovation est un de ceux-là. Le changement d'échelle des dynamiques de rénovation et ses implications (formation et recrutement des professionnels pour assurer des rénovations performantes, politiques publiques permettant de déclencher des investissements d'ampleur de la part des maîtres d'ouvrage…) est donc un incontournable de toute trajectoire de transition pour le bâtiment ;

- réinvestir la vie quotidienne comme axe de travail. De nombreux leviers d'action explorés dans les scénarios vont à l'encontre de normes sociales (confort, hygiène…) héritées du XIXe siècle et consolidées au siècle suivant par les politiques publiques dans une société peu consciente des limites environnementales. Or, le scénario 4 montre que les progrès technologiques d'ampleur peuvent au mieux compenser l'évolution tendancielle des modes de vie, mais en aucun cas permettre de réduire la consommation liée à la vie quotidienne. L'enjeu de la transition est donc celui de la redéfinition de ces normes et imaginaires sociaux pour les rendre compatibles avec les limites planétaires (vivre dans des espaces plus petits, avec moins d'équipements…). Il s'agit d'une évolution d'ampleur et qui doit se réaliser dans un temps beaucoup plus court que les précédentes transformations historiques du bâti (par exemple il a fallu 50 ans en France pour que l'ensemble des logements soient équipés de toilettes). Elle dépasse donc largement l'adoption d'écogestes par les ménages ;

- anticiper pour éviter les consommations supplémentaires liées à de nouveaux usages. Les projections de consommation d'énergie des data centers hébergeurs dans S3 et S4 montrent que l'augmentation de consommations dans certains secteurs peut annuler les efforts fournis par les autres. Autre exemple : selon la manière dont il est géré, le rafraîchissement des bâtiments peut entraîner des consommations variant d'un facteur 10. Ainsi, des politiques permettant d'anticiper ces consommations pour mieux en orienter la trajectoire dès maintenant sont nécessaires ;

- **explorer les leviers d'action à l'échelle du parc**. L'optimisation de l'occupation du parc existant fait l'objet de peu d'intervention publique à l'heure actuelle. Il est donc intéressant d'introduire **des politiques de gestion du parc bâti dans son ensemble**. Par exemple, une partie des locaux de bureaux et de commerce est à l'aube de mutations majeures : celles-ci peuvent être mises à profit pour la transition si les changements d'usage sont facilités. Cela demande des interventions conjointes au tertiaire et au résidentiel qui dépassent les silos actuels de politique publique. **L'enjeu est également d'assurer la convergence entre les choix individuels des maîtres d'ouvrage et les grandes orientations choisies pour le parc**. En effet, une stratégie pertinente à l'échelle d'un bâtiment peut ne pas l'être à l'échelle du parc. Par exemple, en ce qui concerne les vecteurs énergétiques, il s'agit de s'assurer, dans les scénarios de baisse importante de la part du gaz fossile, que les rénovations incluent un changement de vecteur, ou, dans ceux qui prévoient un développement important des réseaux de chaleur, que chaque bâtiment qui le peut se raccorde à un réseau.

6.3. Articuler les instruments politiques et agir à toutes les échelles

Les scénarios explorent une myriade de leviers d'action spécifiques à chaque usage de l'énergie. Par exemple, la baisse de consommation des équipements électroménagers obtenue dans S1 et S2 provient à la fois d'une action sur le taux d'équipement des ménages, leurs modalités d'utilisation (réglages, nombre de cycle, taux de remplissage…), leurs choix d'achat (seconde main), l'efficacité des équipements (puissance, lisibilité des interfaces utilisateurs…), mais aussi de l'infrastructure commerciale (conseils des vendeurs, réseau de réparateurs, disponibilité des appareils de seconde main…).

Les déterminants du changement sont donc, certes, individuels, mais aussi collectifs : l'individu est aidé ou contraint dans son action par les réalités économiques, sociales et matérielles de la société dans laquelle il évolue. **C'est donc un ensemble d'outils complémentaires et articulés, s'adressant à l'ensemble des acteurs et à toutes les échelles qui doit être mis en place** [37].

6.4. Se doter de nouveaux indicateurs

L'exploration des leviers de transition montre la nécessité de se doter de nouveaux indicateurs pour piloter la transition du bâtiment. Il peut s'agir :

- **de faire évoluer des indicateurs existants**. Par exemple, S1 et S2 intègrent l'idée de mesurer la performance des bâtiments sur les consommations réelles (et non calculées, comme par le passé) et par occupant (plutôt que par m²) ;

- **d'introduire nouveaux indicateurs**. Par exemple, l'optimisation de l'occupation du parc existant demanderait de compléter l'indicateur actuel du nombre de m² par personne rapporté à la seule surface de résidences principales par un nouvel indicateur qui exprimerait la surface par personne dans le parc en prenant l'ensemble des logements.

6.5. Prendre en compte la diversité des groupes sociaux et des territoires

L'ampleur des changements inscrits dans les scénarios implique des évolutions de l'ensemble des groupes sociaux et des territoires. Si certains disposent des ressources nécessaires (financières, sociales…) pour évoluer, d'autres en sont moins pourvus. Par exemple, la rénovation des bâtiments demande des ressources financières, des compétences, du temps pour gérer un chantier… Autre exemple : certains territoires sont plus propices à la mutualisation des espaces ou aux changements d'usage. Ainsi, il est nécessaire de prendre le temps de comprendre de quelle façon les différents groupes sociaux et territoires peuvent être impactés par les changements et adapter le soutien apporté aux spécificités de chacun.

6.6. Soutenir la recherche sur les approches multicritères

La politique de transition doit intégrer de nombreuses dimensions qui ne sont que partiellement traitées dans cet exercice : impacts environnementaux autres qu'énergie et carbone, adaptation aux évolutions de l'environnement, dimensions sociales et économiques… Ces multiples facettes sont peu étudiées (et encore moins modélisées) conjointement. Aussi est-il nécessaire de soutenir la recherche afin de développer des méthodologies permettant d'adopter une approche multicritère et d'éclairer ainsi le débat public sur les nécessaires équilibres à trouver entre l'ensemble des facettes de la transition.

7. Limites et perspectives

Ce travail de scénarisation présente plusieurs limites qui ouvrent des perspectives pour des travaux futurs. Le premier ensemble de limites a trait à la conceptualisation des scénarios :

- **le choix d'axer les scénarios sur la neutralité carbone telle que définie dans la Stratégie Nationale Bas Carbone**. Cette neutralité est définie à l'échelle de la France et sur des émissions directes, sans prendre en compte l'empreinte énergétique (et encore moins environnementale) globale du secteur. Il est possible que certains choix opérés dans les scénarios conduisent à réduire les émissions de GES sur le sol français mais à les augmenter dans d'autres pays. Les modèles utilisés pour le bâtiment ne renseignent pas sur ce point. Ainsi, une perspective pour l'avenir est de **modéliser l'empreinte environnementale des scénarios** ;

- **le choix d'optimiser les scénarios sur deux seuls critères (énergie et émissions de GES)** : si d'autres impacts (consommation de matériaux, artificialisation des sols…) sont documentés, les scénarios ne sont pas conçus pour être optimisés dans une optique multicritère. Or, une telle approche pourrait amener à revoir certaines trajectoires. Cet exercice a par exemple mis en évidence que les choix en termes de modes constructifs (construction bois…) doivent prendre en compte les ressources rendues disponibles par une gestion durable de la forêt. Là encore, une perspective pour les travaux à venir sera d'intégrer plus finement les autres impacts environnementaux afin de réaliser une optimisation multicritère ;

- **les scénarios ont des angles morts**, et notamment ils n'explorent pas l'ensemble des variables socio-économiques sous-jacentes aux marchés de l'immobilier. Par exemple, ils n'étudient pas les conséquences d'un rééquilibrage territorial sur une potentielle baisse des prix de l'immobilier dans les métropoles et la capacité des acteurs à investir dans la rénovation dans un tel contexte. Une exploration des angles morts serait ainsi une perspective de travail intéressante à l'avenir[34] ;

- **les scénarios impliquent chacun des contextes d'action** (aménagement du territoire, gouvernance de la transition…) qui ouvrent, à des degrés divers, des opportunités et des défis pour la transition du secteur. Néanmoins, **aucun scénario n'explore des crises ou des contextes pouvant être bloquants pour la mise en mouvement des acteurs du bâtiment et de l'immobilier**. Or, de tels contextes sont possibles (crise du financement, pénurie de main-d'œuvre, de matériaux…). Par exemple, la disponibilité de la main-d'œuvre pour mener une rénovation à la hauteur de celle dessinée dans l'ensemble des scénarios reste une question ouverte. Une perspective pour le futur serait d'**analyser les scénarios dans une perspective de crash test pour en analyser la robustesse.**

Scénario « Pénuries »

Les travaux de prospective menés en commun par l'ADEME et le CSTB dans le cadre de la démarche *Imaginons Ensemble les Bâtiments de Demain* ont permis d'identifier quatre grands scénarios d'avenir pour le bâtiment et l'immobilier. Un de ces scénarios correspond à une situation de pénuries, où le bâtiment est privé de ressources clés.

La période qui nous sépare de 2050 est marquée par une difficulté grandissante de la société à gérer le cumul des crises systémiques (changement climatique, pandémies, crises économiques…). Dans ce contexte, une ou plusieurs ressources clés qui permettaient par le passé aux acteurs du bâtiment et de l'immobilier de fonctionner viennent à manquer. Ils se retrouvent bloqués, privés de financement, de ressources humaines, de matériaux ou d'une capacité d'action collective catalysée par l'action publique. Les acteurs réagissent en ordre dispersé, en adoptant des stratégies individuelles ou à petite échelle, pouvant aller jusqu'à la recherche d'autonomie des bâtiments vis-à-vis des réseaux (énergie, alimentation…) existants. Peu à peu, le territoire et la société se fractionnent. Alors que, d'un côté, les bidonvilles réapparaissent et les occupations sauvages de lieux se multiplient, de l'autre, les ménages les plus aisés investissent pour maintenir leur niveau de confort.

Source : extrait des scénarios Imaginons Ensemble les Bâtiments de Demain.

34 Le choix de viser la neutralité carbone et de focaliser l'analyse sur les impacts énergie carbone est la force de l'analyse quantitative menée ici. Les lecteurs intéressés par une analyse plus large mais non quantifiée sur les avenirs possibles du bâtiment et de l'immobilier sont invités à lire les travaux menés par l'ADEME et le CSTB qui est disponible sur www.batimentdemain.fr.

Le second ensemble de limites a trait à la modélisation, et notamment :

- **la fiabilité des données d'observation** : si certains sujets sont très bien documentés, d'autres le sont moins. L'absence de données fines peut empêcher de disposer d'un point à 2020 fiable, ce qui rend fragiles les projections. Par exemple, la proportion de surfaces soumises au Dispositif Éco Énergie Tertiaire n'est pas une donnée robuste. Or, S1 et S2 montrent qu'une variation de 10 % à la hausse de cette estimation pourrait entraîner une baisse de consommation de l'ordre de 10 TWh. Autre exemple, l'absence de données d'observation fiables sur les modes constructifs du tertiaire contraignent à limiter l'analyse aux seules grandes surfaces commerciales, bureaux, locaux enseignement et hôtels ;

- **l'absence de données permettant le calibrage de certaines hypothèses**. Dans la mesure du possible, les hypothèses ont été élaborées à partir d'analyses disponibles (analyse du marché, potentiel de déploiement, scénarios existants…) ou d'expertises internes et externes à l'ADEME. Cependant, l'absence de données ou d'analyses sur certains sujets rend délicat le calibrage des hypothèses. Par exemple, il n'existe pas, à notre connaissance, d'analyse sur les seuils plancher de rentabilité d'un réseau gaz qui aurait permis de calibrer un seuil plancher de nombre de logements raccordés (*cf.* chapitre *2.3.1 Mix gaz*). Autre exemple, en l'absence d'analyses permettant de calibrer les hypothèses sur certains usages spécifiques de l'électricité dans le tertiaire, ces usages ont été laissés constants. De la même façon, les données d'observation sur la consommation finale d'établissements tertiaires rénovés manquent (hors bureaux et locaux d'enseignement). Autre exemple, l'impact du changement climatique sur la répartition des lieux de vie sur le territoire n'a pas été intégré dans ce travail faute d'analyse prospective sur laquelle se baser. De la même façon, l'impact de la rénovation énergétique sur le confort d'été, ou l'impact du changement climatique sur le besoin de chauffage est encore mal connu et donc peu intégré dans ce travail ;

- **la capacité des modèles à représenter la réalité**. Tout modèle est par définition une simplification de la réalité. Ceux utilisés dans cet exercice ont des degrés de finesse variés. Au final, il n'est pas possible de quantifier les marges d'incertitude associées aux résultats des modélisations. Les résultats présentés ici doivent donc être considérés comme des ordres de grandeur et non comme une analyse d'impact précise des leviers explorés par les scénarios ;

- **la capacité des modèles à capter des enjeux prospectifs nouveaux ou à explorer des nouveaux leviers de transition**. Malgré le grand nombre de modèles utilisés pour cet exercice, certaines évolutions restent encore mal captées. C'est le cas, par exemple, de la bascule du commerce vers le e-commerce, des changements d'usage entre résidentiel et tertiaire, de la dynamique de l'habitat communautaire, mais également des variations d'intensité d'usage, des capacités d'optimisation de l'utilisation du parc existant… Ce sont autant d'enjeux prospectifs émergents que les modèles, conçus pour représenter une réalité passée, représentent mal. Cela plaide pour un travail d'amélioration continue des modèles alliant veille prospective pour identifier les sujets à modéliser et évolution de ces derniers ;

- **le raisonnement par la moyenne dans une société faite de diversité**. Les leviers explorés dans les scénarios expriment des moyennes pour l'ensemble des Français. Par exemple, les modèles représentent l'évolution moyenne du taux d'équipement en climatisation, en téléviseurs… Or, il y a besoin d'explorer, au-delà des moyennes, la façon dont les différents groupes sociaux, porteurs de normes, de pratiques et de ressources différentes peuvent se saisir de ces leviers. Une piste de travail est donc une représentation plus fine des groupes sociaux ;

- **la faible prise en compte des spécificités territoriales** : les modèles utilisés dans cet exercice raisonnent pour la plupart à l'échelle de la France métropolitaine. Le parc de bâtiments n'a pas fait l'objet d'une projection à l'échelle infranationale. Cela limite la finesse des modélisations sur des leviers ayant une forte dimension territoriale. Par exemple, le modèle VIVALDI permet de paramétrer le taux de surfaces tertiaires raccordées aux réseaux de chaleur, mais pas de moduler ce raccordement en fonction de leur localisation (proximité ou non avec un réseau de chaleur existant, possibilité de créer un nouveau réseau…).

Le modèle intégrant toutes les dimensions de la transition n'existe pas et est sans doute impossible à concevoir. L'avenir sera donc sans doute fait de modèles multiples permettant de creuser une facette de la transition, à l'image des modèles sur la climatisation ou la consommation de ressources utilisés dans cet exercice. Il est crucial de s'assurer que ces modèles sont conçus pour dialoguer entre eux (compatibilité des périmètres, des niveaux de désagrégation…) afin qu'ils puissent collectivement former une base solide pour éclairer l'action publique.

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **INSEE**, « 36,6 millions de logements en France au 1er janvier 2019 », *INSEE Focus*, n° 173, 2019.

[2] **Observatoire des territoires**, *Le Parc de logements. Fiche d'analyse de l'Observatoire des territoires*, revue en détail, novembre 2017.

[3] **CEREN**.

[4] **INSEE**, *Enquête nationale logement*, 2013.

[5] **CEREMA**, *L'artificialisation et ses déterminants d'après les fichiers fonciers, période 2009-2018 – Chiffres au 1er janvier 2018*, 2020.

[6] **ADEME**, *Chiffres clés Climat, air, énergie*, 2018.

[7] **ADEME**, *Objectif Bâtiment Bas Carbone, Retour sur le dispositif OBEC. Selon la méthode d'ACV statique utilisée dans E+C-.*, 2020.

[8] **INSEE**, *Les Conditions de logement en France*, INSEE Références, 2017, p. 144-145.

[9] **Christelle Minodier**, *Vers une nouvelle mesure de l'intensité de peuplement des logements*, INSEE, Document de travail n° F0607, 2006.

[10] **ADEME, Johan Lhotellier *et al.***, *Modélisation et évaluation ACV de produits de consommation et biens d'équipement*, Rapport, 2018, 186 pages.

[11] **Comité Prospective Imaginons Ensemble les Bâtiments de Demain**, *Fiche facteur clé « Modes d'occupation des logements »*, 2021.

[12] **Virginie Dejoux *et al.***, *Panorama de l'évolution des conditions de logement en France depuis la fin des années 1960*, Espace populations sociétés [en ligne], 2019/3 | mis en ligne le 28 janvier 2020.

[13] **Harris Interactive**, *Les Français et la colocation*, 2018.

[14] **INSEE**, *Consommation et épargne des ménages* [en ligne], mis en ligne le 3 décembre 2020.

[15] **INSEE**, « 374 000 logements supplémentaires chaque année entre 2010 et 2015 », *INSEE Première*, n° 1700, 2018.

[16] **Jill Madelenat**, *La Consommation énergétique du secteur tertiaire marchand. Le cas de la France avec données d'enquête à plan de sondage complexe*, Thèse en science économique, université Paris Ouest-Nanterre La Défense, 2016, 375 pages.

[17] **CGDD**, « L'Empreinte carbone de la consommation des Français : évolution de 1990 à 2007 », *Le Point sur*, n° 114, 2012.

[18] **DATALAB**, *Chiffres clés de l'environnement, édition 2016*, 2017.

[19] **DATALAB**, *Bilan environnemental de la France, édition 2020*, 2021.

[20] **DATALAB**, *Les émissions de CO_2 liées à l'énergie en France de 1990 à 2017. Facteurs d'évolution et éléments de comparaison internationale*, 2019.

[21] **INSEE**.

[22] **Sit@del**.

[23] **Fondation Abbé Pierre**, *Le Mal-logement en France*, 2018.

[24] **DATALAB**, *Une nouvelle grille de lecture des territoires pour le logement. La maille habitat*, 2019.

[25] **Denis Burckel *et al.***, *La Détention d'actifs immobiliers*, Management de l'immobilier, 3e édition, Vuibert, 2018.

[26] **SDES**, Bilan de l'énergie, Série longue, 2019.

[27] **SDES**, *Le Parc de logements par classe de consommation énergétique*, Document de travail n° 49, 2020.

[28] **Observatoire National de la Rénovation Énergétique**, *La Rénovation énergétique des logements. Bilan des travaux et des aides entre 2016 et 2019*, 2021.

[29] **CGDD**, *Les Produits pétroliers, principale énergie dans le secteur de la construction*, 2017.

[30] **ADEME, Philippe Leonardon, CSTB, Sylvain Laurenceau, Mathilde Louerat, CORE E.**, *Prospective de consommation de matériaux pour la construction des bâtiments neufs aux horizons 2035 et 2050*, 2019, 113 pages.

[31] **BIPE, FCBA**, *Étude prospective : évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments*, Rapport pour l'ADEME, France Bois Forêt et le CODIFAB, 2019.

[32] **TERRA, TBC Innovations, ELCIMAÏ Environnement, Au-Dev-Ant, ADEME**, *Étude de préfiguration de la filière REP Produits et Matériaux de Construction du secteur du Bâtiment (PMCB)*, 2020.

[33] **CITEPA**, Format SECTEN, avril 2021.

[34] **ADEME, CODA STRATÉGIES**, *La Climatisation de confort dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. État des lieux 2020* – Synthèse, 13 pages, 2021.

[35] **ADEME, DORÉMI, ENERTECH,** *La Rénovation performante par étapes – Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC Rénovation ou équivalent à terme en logement individuel*, 2020, 196 pages.

[36] https://www.observatoirebbc.org/.

[37] **Solange Martin, Albane Gaspard**, *Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité. L'apport des sciences humaines et sociales pour comprendre et agir*, 2016.

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2015	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
RÉSIDENTIEL – nombre de personnes par logement en 2050 [hab./logement]	2,23	2,02	2,12	2,12	2,02	2,02
RÉSIDENTIEL – taux de résidences secondaires en 2050 [%]	9,5%	9,1 %	2,5 %	5 %	9,1 %	9,1 %
RÉSIDENTIEL – part des maisons individuelles dans les logements construits en 2050 [%]	45 %	45 %	15 %	15 %	25 %	45 %
RÉSIDENTIEL – nombre de logements neufs construits entre 2015 et 2050 [Millions]	-	10	4	5	12	10
RÉSIDENTIEL – part des logements ayant atteint le niveau BBC Rénovation ou plus 2050 [%]	-	16 %	79 %	81 %	20 %	40 %
RÉSIDENTIEL – part des logements dont l'ensemble de l'enveloppe a été rénovée, mais sans inscription dans une trajectoire de performance [%]	-	29 %	14 %	14 %	69 %	9 %
RÉSIDENTIEL – proportion des maisons individuelles avec appoint solaire eau chaude sanitaire en 2050 [%]	-	5 %	5 %	45 %	45 %	45 %
RÉSIDENTIEL – consommation unitaire d'électricité spécifique par résidence principale [MWhEF/ logement]	1,9	1,4	0,7	1	1,3	1,8
RÉSIDENTIEL – part des systèmes gaz changés lors des rénovations (en anticipation par rapport à la durée de vie moyenne) et basculant vers une autre énergie – maisons individuelles (2020-2050) [%]	-	3 %	87 %	42 %	37 %	35 % puis 30 %
RÉSIDENTIEL – température de consigne pour la climatisation en maison individuelle en 2050 [°C]	-	22 °C	26 °C	26 °C	22 °C	22 °C

Suite page suivante

	2015	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
TERTIAIRE – surface construite entre 2015 et 2050 [Millions de mètres carrés, surface chauffée]	-	261	130	132	166	261
TERTIAIRE – proportion du parc de bureaux existants en 2015 chauffés par pompe à chaleur en 2050 [%]	-	52 %	80 %	71 %	72 %	62 %
TERTIAIRE – taux de croissance du volume de données traité par les petits data centers (EB) [%]	-	50 % par an jusqu'en 2025, 40 % de 2026 à 2040. Cette croissance diminue ensuite à partir de 2043 pour atteindre 30 %	Tendancielle jusqu'à 2023. À partir de 2024, elle diminue par palier de 10 % tous les 2 ans pour devenir nulle à partir de 2032	Tendancielle jusqu'à 2030. Diminue de 10 % en 2031 puis à partir de 2032, par palier de 5 % tous les ans pour devenir nulle à partir de 2037	50 % par an jusqu'en 2025 puis de 40 % de 2026 à 2040	Tendancielle jusqu'à 2025. À partir de 2026, elle augmente de 10 % par rapport au tendanciel pour rester à 60 % jusqu'à 2028. Le rythme décroît ensuite progressivement jusqu'à 25 % en 2050
Modes constructifs bois (CLT, ossature bois, poteaux-poutres, mixtes) [% selon les usages et les bâtiments]	De 2 % à 8,5 %	-	De 37 % à 50 %	De 38 % à 42 %	De 21 % à 34 %	De 12 % à 20 %
Isolants biosourcés dans le neuf (planchers bas, toitures, murs) [% selon les usages et les bâtiments]	De 0 % à 10 %	-	De 30 % à 45 %	De 30 % à 45 %	De 10 % à 20 %	De 20 % à 35 %

01 ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION

3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises

1. Synthèse de la problématique et des enjeux pour le secteur
173

2. Des émissions en très forte croissance depuis 1960
178

3. Des modalités de transport en pleine évolution
183

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios
187

5. Les scénarios divergent surtout sur la demande de transport
192

6. Grande variabilité de la demande entre les scénarios
216

7. Des transformations de rupture s'imposent
225

8. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs
227

9. Références bibliographiques
229

10. Annexe : évolution des principales variables du secteur
230

1. Synthèse de la problématique et des enjeux pour le secteur

Le secteur des transports se décline autour de la mobilité des personnes et du transport de marchandises. Un certain nombre d'enjeux étant communs (dépendance au pétrole, externalités, importance dans l'économie, etc.), cette partie évoque d'abord ces enjeux globaux des transports, avant de détailler certaines particularités plus spécifiques à la mobilité des voyageurs, puis au transport de marchandises.

IMPORTANCE DE LA TRANSFORMATION DU SECTEUR : ÉMISSIONS, ÉNERGIE, RESSOURCES

Le secteur fait face à une **dépendance majeure au pétrole**, qui représente plus de 90 % de sa consommation d'énergie. Le solde est issu des biocarburants (7 %) et pour une plus faible part de l'électricité (2 %, essentiellement dans le ferroviaire ; [1]). Il y a donc un véritable enjeu de transformation du secteur pour une diversification énergétique vers des énergies moins carbonées. Au-delà des nécessaires baisses de consommations d'énergie, la réduction de cette dépendance pourra se faire *via* l'électrification, le recours au bioGNV (gaz naturel pour véhicules issu de matières organiques), aux biocarburants ou l'emploi du vecteur hydrogène issu d'une production décarbonée.

La consommation de pétrole pose un problème en termes d'émissions de gaz à effet de serre, mais également de pollution atmosphérique, en particulier dans les zones denses et à proximité des routes à forts trafics. En outre, cette dépendance crée une situation de vulnérabilité vis-à-vis des ressources en pétrole. Elles sont limitées, la France les importe et la volatilité des prix impacte le budget des ménages et l'ensemble de l'économie.

Concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES), les transports constituent le premier secteur émetteur en France, avec 31 % des émissions du territoire en 2019, dont 94 % sont dues au transport routier si l'on exclut les transports internationaux [2]. Environ les deux tiers des émissions sont liées au transport de voyageurs et le tiers restant au fret. C'est également le seul secteur dont les émissions ont progressé depuis 1990, malgré une légère baisse dans les années 2000 suivie d'une relative stabilité. À l'avenir, une forte baisse des émissions de GES du secteur est prévue. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) fixe un **objectif de décarbonation quasi complète du secteur d'ici 2050**, seuls les transports maritime et aérien conservant une part d'énergies fossiles à cet horizon.

Les transports aérien et maritime liés aux échanges internationaux ne sont pas comptabilisés dans les inventaires nationaux. Ils représentent pourtant l'équivalent de 18 % des émissions du transport intérieur. De même, les inventaires ne tiennent compte ni des émissions liées à la production de l'énergie, à la production et à la fin de vie des véhicules, ni de la construction et de l'entretien des infrastructures de transport. Ces autres dimensions présentent des enjeux importants de consommation de ressources (métaux, béton, biomasse, électricité, etc.), de pollution ou encore d'occupation des sols et pourraient constituer des points essentiels en matière de transition écologique du secteur. Dans le présent exercice, les consommations et émissions qui y sont associées sont comptabilisées dans d'autres secteurs de l'économie (notamment chapitre ***2.2.3. Production industrielle***).

UNE TRANSFORMATION AUX MULTIPLES FACETTES

Au-delà des enjeux directement liés à la transition écologique des transports, le secteur doit faire face à de nombreuses externalités, aussi bien environnementales, qu'économiques et sociales. Ainsi les externalités de congestion et d'occupation de l'espace, d'accidentologie, de bruit ou de sédentarité (et ses impacts sur la santé) sont particulièrement importantes à intégrer. De nombreuses transformations liées à la transition écologique présentent des cobénéfices importants sur ces externalités, en particulier les leviers qui agissent sur la demande de mobilité : distances parcourues, report modal ou une utilisation plus sobre des véhicules (poids, vitesse, covoiturage, etc.).

Par leur rôle essentiel dans les modes de vie et le fonctionnement de l'économie, les transports sont aussi au cœur d'enjeux économiques et sociaux importants. La forte hausse des prix du pétrole précédant la crise de 2008, ou plus récemment la crise des Gilets jaunes, ou encore la crise de la Covid-19 et les restrictions de déplacement qui en ont découlé illustrent combien le transport peut cristalliser les tensions.

La dépense totale de transport représente 425 milliards d'euros en 2018, soit 18 % du PIB. Le secteur est un pourvoyeur d'emplois important, que ce soit directement dans la branche des transports (1,4 million d'emplois [1]) ou indirectement chez les équipemen-

tiers et constructeurs de matériels de transport (automobile, aéronautique, ferroviaire, etc.), dans les services de transport (concessionnaires, entretien et réparation, assurance, etc.) ou dans la construction et l'entretien des infrastructures de transport.

Le secteur, qui implique de nombreux acteurs publics, au niveau local et international, mais aussi les entreprises, les citoyens, les usagers et les ONG, présente également des défis importants en termes de gouvernance. Celle-ci est d'autant plus délicate à organiser que les enjeux sont contrastés selon les territoires, en termes d'aménagement, d'accès aux transports et aux services, d'inclusion ou d'inégalités sociales. Les dernières évolutions des politiques publiques donnent de plus en plus de poids aux régions et aux intercommunalités sur les transports, en tant qu'autorités organisatrices de la mobilité (AOM).

Enfin, l'essor du numérique est source de défis et d'opportunités pour le secteur. De nouveaux outils émergent : télétravail, information voyageurs en temps réel, applications et plateformes multimodales, e-commerce, véhicules de plus en plus connectés et autonomes à l'avenir. Mais leur impact sur la mobilité et la transition écologique reste à évaluer.

DES FREINS ET DES LEVIERS POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Ces évolutions constituent à la fois des freins et des leviers pour la transition écologique du secteur. Si celle-ci pourrait permettre de limiter de nombreux impacts environnementaux, sociaux et économiques actuels des transports, les différentes options peuvent poser des problèmes de conditions de réalisation ou d'emploi. Cela concerne en particulier certaines mesures de sobriété, mais également les limites que constitue le coût de la transition ou de la disponibilité des ressources pour déployer les technologies.

DIAGNOSTIC DES GRANDS CHOIX À FAIRE EN MATIÈRE DE DÉCARBONATION

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) entend mobiliser **cinq leviers pour limiter l'impact carbone des transports** : la modération de la demande de transport, le report modal, l'optimisation du remplissage des véhicules, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la décarbonation de l'énergie utilisée [3].

Figure 1 Les cinq leviers de la transition énergétique des transports

Source : décomposition des émissions des transports sous forme d'identité (ou d'équation) de Kaya [4].

Ces leviers sont autant de grandes options à combiner pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, en intégrant également les enjeux de ressources. Les trois premiers leviers ont davantage à voir avec des changements organisationnels, dans l'aménagement, les comportements et les modes de vie, tandis que les deux derniers leviers interrogent davantage le choix des technologies utilisées. Selon les scénarios, l'importance des différents leviers utilisés pour réduire les émissions peut grandement varier, de même que les choix concernant un même levier, par exemple, différentes énergies permettent de décarboner le secteur : électricité, hydrogène, biogaz, biocarburants, voire carburants de synthèse.

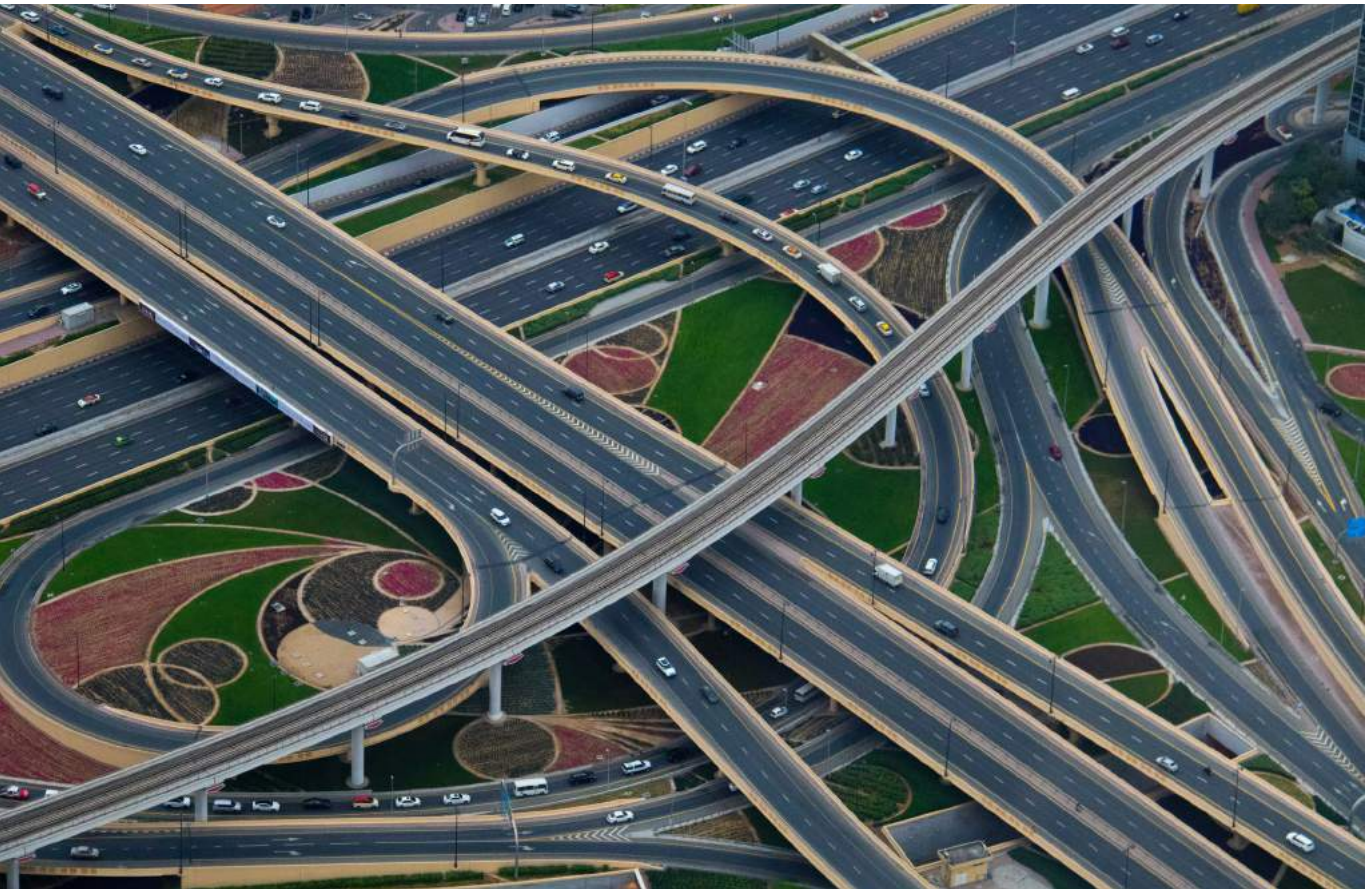
Il est important de noter qu'**il existe de nombreuses interactions entre les leviers**. Ainsi la modération de la demande peut faciliter le report vers les modes actifs. Le passage à l'électrique permet d'améliorer l'efficacité énergétique (rendement moteur), et l'électrification pourrait aussi influencer la demande de mobilité, au vu des autonomies encore limitées des véhicules électriques. À l'inverse l'efficacité énergétique ou le covoiturage peuvent encourager une hausse de la demande ou un report vers la voiture.

1.1. La mobilité des voyageurs appelée à évoluer

La mobilité des voyageurs est caractérisée à la fois par des usages fonctionnels (travail, études, alimentation, santé, etc.) et des usages de loisirs (week-end, vacances, sports-détente, culture, etc.). Elle touche directement aux modes de vie, par l'articulation des activités que permettent les 3 à 4 déplacements réalisés en moyenne par jour. Enfin, elle représente un coût financier, mais aussi un temps passé dans les transports d'environ une heure par jour et par personne en moyenne [5] qui peut être vécu comme un réel inconvénient ou mis à profit en partie pour réaliser d'autres activités.

Le premier levier est celui de **la modération de la demande de transport**. Le degré de sollicitation de ce levier est plus ou moins marqué selon les visions de la transition écologique, en fonction des différents acteurs, visions politiques, scénarios de prospective, etc. En effet, l'augmentation des distances parcourues peut être perçue de façon positive, en raison de la possibilité d'accéder à des territoires plus vastes, de multiplier les déplacements et les opportunités qu'ils offrent, de découvrir des destinations plus lointaines et dépaysantes dans le cas des déplacements de longue distance. Ces distances importantes peuvent également être perçues de façon négative, comme une source de désagréments pour la société (émissions de gaz à effet de serre, de polluants atmosphériques, bruit, accidents, congestion, etc.), comme un coût économique pour les usagers ou les finances publiques, ou encore comme une perte de temps dans les transports, pour des trajets qui peuvent être désagréables, voire subis. À l'avenir, selon la vision portée sur ces avantages et inconvénients relatifs à une mobilité sur des distances importantes, les politiques publiques et la société pourraient s'orienter vers un idéal de poursuite de la croissance des mobilités (voyages à l'international, accélération des mobilités au quotidien, poursuite de l'étalement urbain, etc.) ou au contraire vers une baisse des distances parcourues (urbanisme et aménagement de la proximité, sobriété dans les déplacements, tourisme plus local, etc.).

Le second levier de **report modal** est aussi lié à la demande de transport. Les modes de transport les plus utilisés ne sont pas les mêmes selon les distances à parcourir, les types de territoires ou encore les destinations de voyages. Ainsi, le transport aérien est utilisé pour les distances les plus longues, tandis que sur des distances nationales ou régionales, la voiture, les autocars et le train se partagent le reste des trajets de plus de 80 km. Sur les déplacements du quotidien, le partage modal se fait entre la voiture, les transports



en commun (bus, cars, métros, tramways, TER, etc.) et les modes actifs (marche et vélo), dont l'utilisation peut être très variée selon les caractéristiques des déplacements. Ces caractéristiques et les incitations à l'usage des différents modes (infrastructures, véhicules, fiscalité, réglementations, etc.) pourraient varier à l'avenir et entraîner des évolutions sensibles dans l'usage des modes de transport.

L'usage de la voiture, aujourd'hui largement dominant pour la courte et longue distance, pourrait également être modifié par les évolutions du **remplissage des véhicules**, qui constitue le troisième levier de décarbonation. Ainsi, le développement du covoiturage pourrait renverser la tendance historique à la baisse du remplissage moyen des voitures. Les autres modes disposent également pour certains d'entre eux de marges de manœuvre sur des trajets peu remplis, en particulier pour l'utilisation des transports en commun en dehors des périodes de pointe de la demande ou sur certaines destinations peu fréquentées.

Le développement du covoiturage pourrait renverser la tendance historique à la baisse du remplissage moyen des voitures.

Le quatrième levier d'**efficacité énergétique** concerne premièrement les évolutions possibles sur les motorisations, *via* les progrès sur les moteurs thermiques, l'hybridation ou l'électrification des moteurs. Pour le transport routier, un meilleur aérodynamisme ou des progrès sur les frottements liés aux pneus sur la chaussée favorisent une meilleure efficacité. Le poids des véhicules pourrait également être un levier de réduction des consommations pour certains modes. Enfin, l'évolution des vitesses pratiquées ainsi que l'écoconduite peuvent permettre d'optimiser les consommations.

Le dernier levier concerne la **réduction de l'intensité carbone de l'énergie**, ou sa décarbonation, en agissant sur les motorisations et sur le contenu carbone de l'énergie utilisée. Les motorisations peuvent en effet évoluer depuis le vecteur des carburants liquides largement utilisés aujourd'hui vers les vecteurs gaz, hydrogène ou électricité. Ces vecteurs énergétiques peuvent être plus ou moins décarbonés, selon l'énergie utilisée et sa transformation. Pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il faut que les carburants liquides soient des biocarburants produits durablement, que le gaz soit du biogaz, et que la production d'hydrogène et d'électricité soit décarbonée.

1.2. De forts enjeux économiques sur la transition du transport de marchandises

L'évolution du transport de marchandises résulte des modifications des activités économiques du pays depuis plusieurs décennies, conjuguées à la mondialisation des échanges. Ainsi, au niveau national, l'évolution de l'économie a été marquée par une croissance des services, une décroissance d'un certain nombre d'activités industrielles lourdes et la baisse de production de certains biens de consommation. Au niveau international, une partie de ces activités a été délocalisée en fonction des différentiels de compétitivité économique. Dans le même temps, les importations de biens ont augmenté, depuis de simples composants (ex. : électronique) jusqu'aux produits finis.

Les chaînes logistiques sont ainsi de plus en plus internationales, aussi bien au sein de l'Europe qu'avec les autres continents. L'accélération du système de production et d'échanges qui a caractérisé l'évolution de l'économie s'est traduite par **des flux intenses et de plus en plus rapides**. Dans ce contexte, deux modes se sont largement imposés. Pour les transports internationaux de longue distance, le transport maritime est dominant. La massification du transport et la forte efficacité énergétique par unité de trafic transportée favorisent un très faible coût de transport sur les distances intercontinentales. De l'échelle continentale jusqu'aux courtes distances, c'est le transport par la route qui représente l'immense majorité des flux, avec près de 90 % des flux nationaux. La compétitivité du transport routier, mais aussi sa grande flexibilité et la possibilité de faire des trajets de point à point permettent de s'adapter plus facilement à l'accélération, à la diversification et à la fragmentation des échanges et expliquent cette domination.

Les cinq leviers de la SNBC cités pour les voyageurs peuvent également être appliqués au fret.

Le levier de **modération de la demande de transport de marchandises** est fortement dépendant des évolutions de l'économie, notamment du PIB et du volume de biens en circulation, du type de biens transportés et de la localisation des activités économiques, qui conditionnent en partie les distances parcourues par les marchandises. La logistique s'adapte égale-

ment à des modes de vie et de consommation en profonde évolution, en particulier en lien avec l'essor du numérique. Celui-ci influence les comportements d'achat, mais aussi l'organisation de l'offre logistique, à la fois facteur de risques et d'opportunités. Des évolutions récentes ou à venir, dont la persistance et les conséquences restent à préciser, pourraient aussi influencer l'évolution de ces éléments. Il s'agit notamment de la course à la vitesse pour les livraisons du e-commerce, de la relocalisation d'une partie de l'économie, du développement des circuits courts, de l'économie circulaire ou encore de l'évolution de la logistique des derniers kilomètres en milieu urbain. Enfin, la crise de la Covid-19 a montré la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnements rapides, à flux tendus et fonctionnant avec des stocks réduits. Elle a permis de questionner la résilience de la logistique mondiale aux chocs, qu'ils soient de nature sanitaire, économique, géopolitique ou, de plus en plus fréquemment, liés à des perturbations climatiques.

Concernant les transports intérieurs, les poids lourds dominent les échanges pour le transport le plus massifié et sur longue distance. Les véhicules utilitaires légers (VUL) sont davantage utilisés pour les plus petits volumes et la livraison dite du dernier kilomètre. Le **report modal favorable à la transition écologique** consiste à réduire la part du transport routier, qui domine aujourd'hui largement, au profit du ferroviaire et du fluvial pour la longue distance et vers le transport par vélo cargo pour le dernier kilomètre.

Le remplissage des véhicules s'exprime en tonnes par véhicule. Associé au levier précédent de report modal, **le facteur de remplissage pointe l'enjeu de massification du transport de marchandises**. Il s'agit de favoriser des modes avec un emport important et d'éviter la fragmentation du transport par des véhicules utilitaires légers. Un report modal important nécessiterait également de profondes évolutions des fiscalités appliquées aux différents modes et une meilleure prise en compte des externalités dans le coût des services de transport. Il nécessiterait également de desserrer les contraintes de temps sur le rythme d'acheminement et de faire preuve d'un fort volontarisme dans les investissements. Cela permettrait de réduire la place des transports routiers et de mieux répartir les flux entre différents modes, en renforçant l'intermodalité (plateformes multimodales, investissements sur les lignes ferroviaires, le fluvial, la logistique à vélo…).

Le quatrième levier est celui de l'**efficacité énergétique** des véhicules, par l'amélioration du rendement des moteurs, l'hybridation, l'écoconduite ou par l'aérodynamisme des véhicules.

Enfin, le **levier d'intensité carbone de l'énergie** est indispensable pour assurer la décarbonation du secteur. Les technologies qui pourraient s'imposer selon les modes, les distances et les catégories de véhicules restent à préciser. Les freins à l'émergence des technologies alternatives sont similaires à ceux de la mobilité des voyageurs. S'y ajoute une sensibilité accrue vis-à-vis des performances économiques de ces solutions pour un usage professionnel.

L'électrique pourrait jouer un rôle, surtout pour les véhicules les plus légers et les courtes distances. Sa contribution sur la longue distance paraît plus compliquée et incertaine. L'hydrogène permet de surmonter l'inconvénient de l'emport des batteries et de la recharge, mais nécessite davantage d'électricité au total (en raison du rendement de la chaîne hydrogène) et coûte aujourd'hui plus cher pour un marché en émergence. Le biogaz présente des avantages similaires à l'hydrogène, mais il est aussi limité par le coût à court terme. De même, à l'instar des biocarburants, il sera confronté de manière croissante aux quantités limitées de biomasse disponible, ainsi qu'aux contraintes de baisse d'émissions de polluants atmosphériques pour accéder aux centres urbains.

Au vu de la faible part actuelle de ces technologies dans le renouvellement du parc de véhicules routiers, de la production d'énergie faiblement décarbonée et du déploiement limité d'infrastructures de recharge, la décarbonation du secteur risque d'être plus lente que pour les voyageurs.

2. Des émissions en très forte croissance depuis 1960

2.1. Mobilité des voyageurs

Le *Graphique 1* présente la tendance des émissions de la mobilité intérieure des voyageurs sur la période 1960-2017 en France. Les émissions sont décomposées entre les 5 leviers de la SNBC cités précédemment (demande, report modal, remplissage, efficacité, décarbonation), afin de rendre compte de leur impact sur **l'évolution des émissions**. Celles-ci ont été multipliées par 4,2 sur l'ensemble de la période, avec un pic au début des années 2000 et une relative stabilité ces dernières années [4].

- La demande de transport (DT) apparaît comme le principal facteur d'évolution des émissions, puisqu'elle a été multipliée par 5,3 sur la période, en raison de l'augmentation de la population (facteur 1,43) et surtout de la hausse des kilomètres parcourus par personne (multipliés par 3,7). Les émissions et la demande évoluent en parallèle sur l'ensemble de la période, ce qui rend compte d'un fort couplage entre les deux, même si un découplage relatif s'observe depuis les années 1990. Les quatre autres facteurs se sont principalement compensés entre eux.

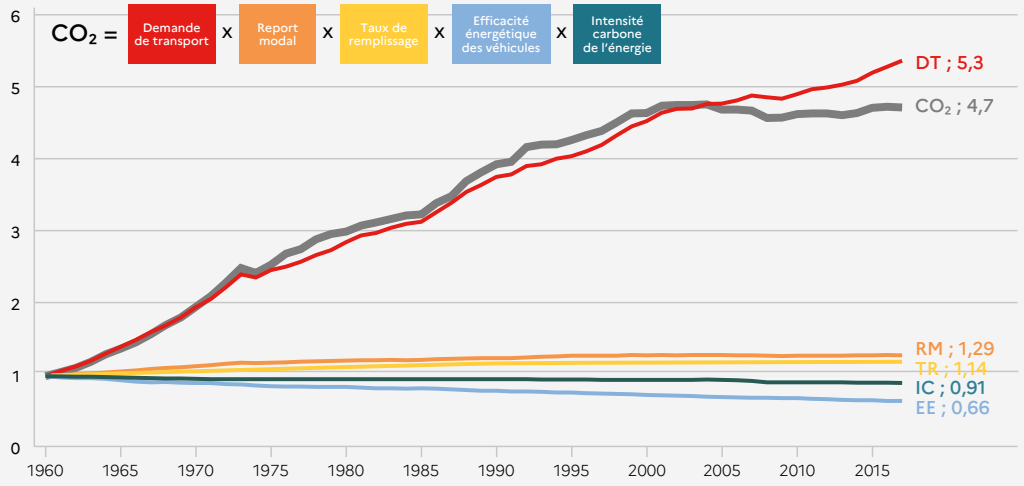
- Ainsi sur longue période, le report modal (RM) a eu un effet défavorable sur les émissions (+29 %), qui s'explique essentiellement par le report de la marche vers la voiture en début de période. Depuis le milieu des années 1990, un léger report est observé de la voiture vers le ferroviaire, tandis que le transport aérien continue de prendre une part croissante dans les kilomètres parcourus.

- L'autre facteur ayant eu un impact à la hausse sur les émissions des transports est le taux de remplissage des véhicules (TR) (impact de +14 %). Il s'est amélioré pour la majorité des modes, mais a été en forte baisse pour la voiture. Le remplissage moyen y est en effet passé d'environ 2,3 personnes par voiture en 1960 à 1,6 personne actuellement. Cela résulte de la hausse du taux de (multi-) motorisation des ménages couplée à la diminution du nombre de personnes par ménage et la baisse du coût relatif de la voiture.

- L'efficacité énergétique (EE) des véhicules, principal contributeur à la modération des émissions des transports (-34 % sur la période), s'est régulièrement améliorée sur la période, grâce aux progrès sur les moteurs et malgré la forte hausse du poids et de la puissance des véhicules.

- Enfin, le facteur de décarbonation de l'énergie (dit d'intensité carbone ou IC) est celui qui a eu le moins d'impact à ce jour, le secteur étant encore largement dépendant au pétrole. Le principal changement concerne le développement des biocarburants, dont les émissions de combustion ne sont pas comptabilisées dans les inventaires d'émissions. Les biocarburants utilisés aujourd'hui en France entraînent toutefois, du fait de leur mode de production et des possibles changements d'affectation des sols, une réduction des impacts carbone difficilement estimable.

Graphique 1 Décomposition de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de voyageurs (y compris transports aérien international) de 1960 à 2017



Source : [4].

Le *Tableau 1* présentant les trafics voyageurs depuis les années 1990 illustre la croissance importante des modes routiers, ferroviaires et aériens. Ces hausses sont portées en particulier par l'accroissement de la population, le développement économique et par une société toujours plus connectée par les liaisons physiques autoroutières ou encore la grande vitesse ferroviaire (mais aussi par les outils numériques).

Tableau 1 Évolution de la demande de mobilité des voyageurs en Métropole par mode entre 1990 et 2018 en Gpkm [1]

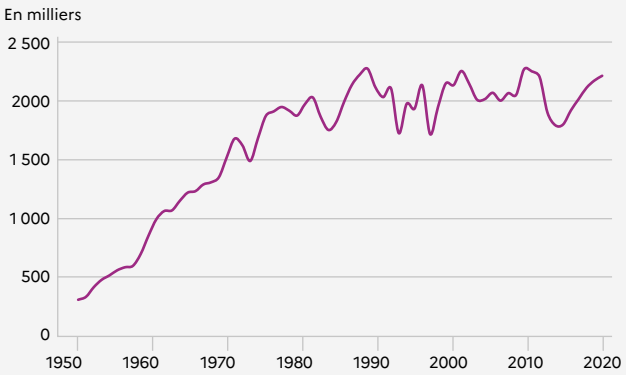
Transport intérieur de voyageurs	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018P
Route	645,1	694,2	747,1	767,3	763,9	795,1	815,6
Fer	75,1	64,4	82,3	90,9	102,2	104,8	107,9
Air	11,4	12,1	15,1	12,9	12,7	14,3	15,9
TOTAL	**731,7**	**770,8**	**844,4**	**871**	**878,8**	**914,2**	**939,4**

2018P = résultats provisoires de 2018.

En intégrant les voyages nationaux depuis ou vers l'Outre-mer et les voyages internationaux depuis la France, les données de mobilités voyageurs sont encore plus élevées : les trafics passagers-kilomètres (Gpkm) aérien outre-mer et internationaux sont 12 à 13 fois plus importants que les flux aériens métropoles (184,8 Gpkm contre 14,3 Gpkm pour l'année 2015 par exemple). Il doit être souligné par ailleurs que ces mobilités très longues distances sont en croissance continue et plus soutenue que pour les vols intérieurs avec sur les cinq dernières années 2015-2019, avant la crise sanitaire de la Covid-19, une hausse de 19 % pour les trafics internationaux et même + 26 % pour les liaisons outre-mer [6].

Au sein des déplacements intérieurs, la voiture occupe une part prépondérante. Après une phase d'augmentation continue liée à la motorisation des ménages, les ventes de voitures neuves connaissent des évolutions en dents de scie depuis les années 1980. Les phénomènes cycliques depuis 1990 s'expliquent par un ralentissement du rythme de renouvellement des véhicules (taux de motorisation des ménages « saturé », crise de 2008, etc.) et des reprises accompagnées par les mesures successives de soutien de type bonus-malus ou primes à la casse.

Graphique 2 Évolution des ventes de voitures particulières neuves en France

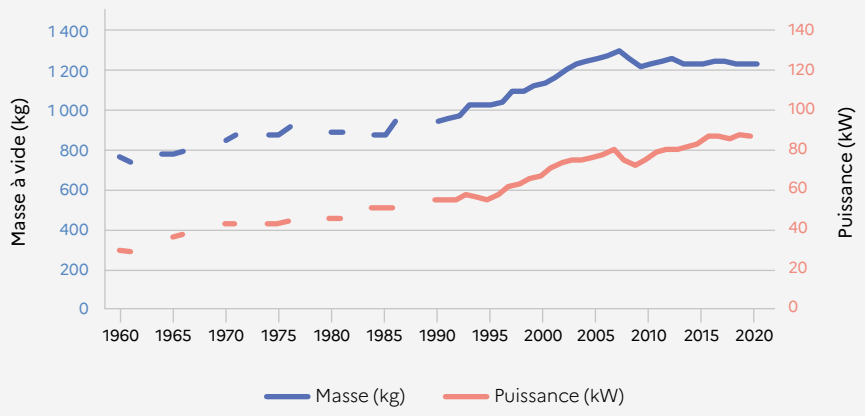


Source : données extraites de [7] [8].

Cette augmentation des volumes s'est accompagnée pour le levier efficacité énergétique d'une croissance significative de la masse à vide des véhicules par effet de taille et du volume des équipements (sécurité et confort) ainsi que des puissances installées. Au-delà d'un frein au progrès sur les consommations énergétiques, ceci a également pour conséquence une consommation de matières à transformer, puis à récupérer/recycler de plus en plus élevée (double effet volume des ventes/taille des parcs et masses des véhicules).

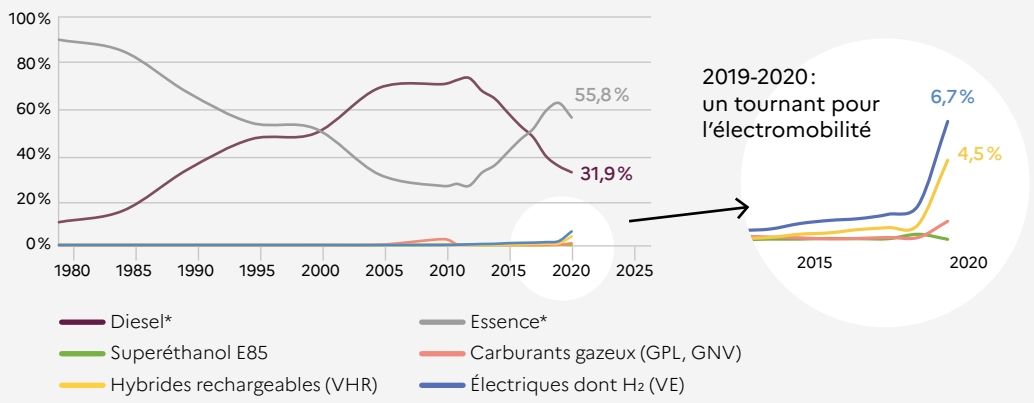
L'évolution la plus marquée des trois dernières décennies a été la **diésélisation des ventes**, avec des impacts à la baisse sur les émissions de CO_2 (meilleure efficacité énergétique des motorisations Diesel) et à la hausse sur la pollution atmosphérique. Le phénomène s'est complètement infléchi depuis 2012, en raison d'une offre moindre sur le segment des petits véhicules urbains, d'une image dégradée en lien avec la pollution et d'une modification de la fiscalité relative au gazole (rattrapage TICPE[1] diesel/essence). L'électrification s'impose comme une nouvelle tendance forte évoquée dans la section suivante.

Graphique 3 Évolution des caractéristiques des voitures particulières neuves (masse, puissance), France 1960-2020



Source : données extraites de L'Argus (1953-1988) et ADEME Car Labelling (1990-2020), [9].

Graphique 4 Évolution de la diffusion des technologies pour les voitures particulières neuves, focus sur le décollage des marchés des VE et VHR en 2019-2020



* Incluant les véhicules hybrides non rechargeables.

Source : [9].

1 Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques.

2.2. Transport de marchandises

Le *Graphique 5* donne les facteurs explicatifs de l'évolution des émissions du fret, qui représentent environ un tiers des émissions des transports intérieurs. Elles ont été multipliées par 3,3 entre 1960 et 2017, une hausse moins forte que celles du transport de voyageurs. Elles ont été plus marquées à la baisse par les crises économiques, aussi bien les chocs pétroliers des années 1970 que la crise de 2008 [4].

- Les évolutions des émissions ont suivi de très près l'évolution de la **demande de transport** de marchandises, qui a été multipliée par 3,4 sur la période 1960-2017 et marquée fortement par les crises économiques, entraînant une baisse des émissions. Car les quatre autres leviers de la transition écologique se sont aussi largement compensés entre eux sur la période, avec des émissions moyennes par tonnes-kilomètres transportées stables sur une longue période.

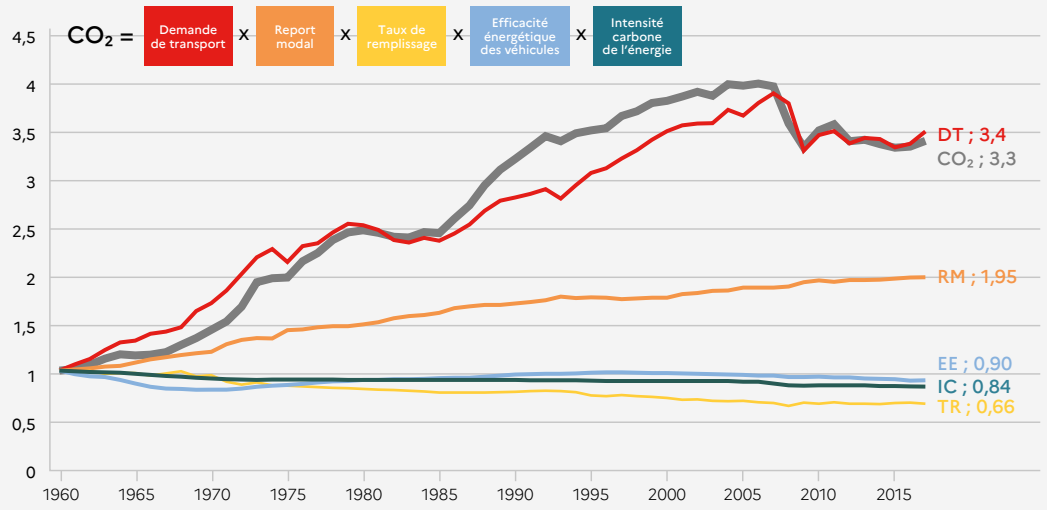
- C'est le **report modal** (RM) qui a contribué très largement à la hausse de ces émissions unitaires, avec un impact de +95 %, pendant que les facteurs suivants ont eu un effet à la baisse. La part modale du transport routier a très fortement augmenté sur la période, passant de 34 % en 1960 à environ 88 % depuis le milieu des années 2000. Cela s'est fait essentiellement au détriment du fret ferroviaire, passé de 56 % en 1960 à environ 10 % du trafic depuis le milieu des années 2000. C'est le résultat combiné de la hausse du trafic total et de la division quasiment par 2,5 des trafics ferroviaires depuis le milieu des années 1970. De même, le trafic fluvial a vu baisser sa part modale d'environ 10 % à 2 % depuis 1960 *(Tableau 2)*.

- Le **remplissage des véhicules** (TR) s'est fortement amélioré pour les différents modes. Il est notamment passé de 5,6 à 9,7 tonnes pour les poids lourds de plus de 3,5 tonnes, le trafic évoluant vers des véhicules de plus en plus capacitaires. L'impact sur les émissions de ce meilleur taux de remplissage est estimé à - 34 %.

- **L'efficacité énergétique** (EE) s'est améliorée de manière moins forte que pour le transport de voyageurs, avec un impact à la baisse d'environ 10 % sur les émissions. En effet, malgré les gains importants sur les moteurs et les résistances à l'avancement, les véhicules ont embarqué un poids croissant de marchandises, avec un impact à la hausse sur les consommations.

- Enfin, la **décarbonation** (IC) a été marquée par les biocarburants, ainsi que, en début de période, par la fin du charbon dans le ferroviaire (qui représentait une large part des flux). La disparition des machines à vapeur peu efficaces a également contribué à améliorer l'efficacité globale.

Graphique 5 Décomposition de l'évolution des émissions de CO_2 du transport intérieur de marchandises de 1960 à 2017



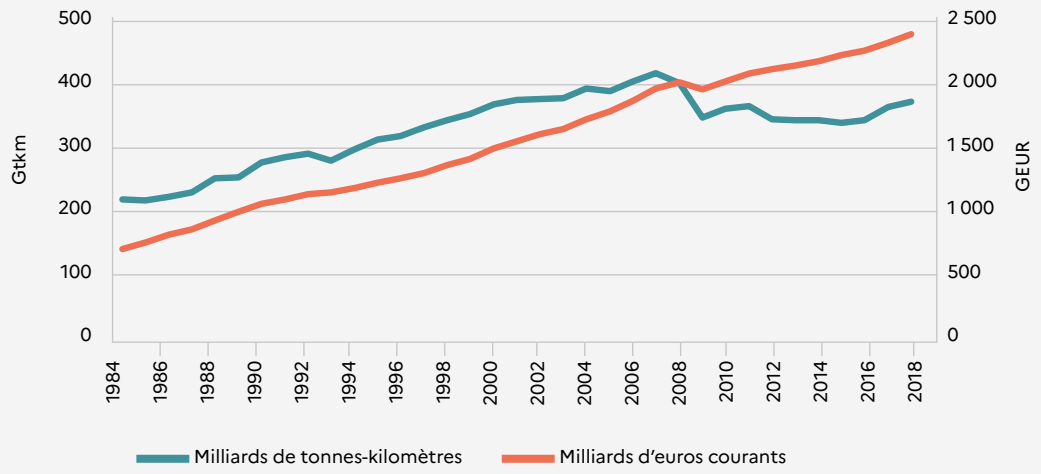
Source : [4].

Dans le **secteur du transport de marchandises**, la tendance des trente dernières années s'articule autour de deux évolutions majeures.

D'une part, **une augmentation importante des flux transportés** (les tonnes transportées multipliées par les kilomètres parcourus) résulte d'un accroissement des échanges de biens, corrélés avec l'augmentation du PIB du pays. Seule la crise financière de 2008 a entraîné une contraction importante des flux de marchandises transportées. La période qui suit semble faire place à une relative stagnation, avant une légère reprise de la demande à la hausse depuis 2015. Le *Graphique 6* illustre une certaine corrélation constatée entre PIB et transport de marchandise, corrélation qui n'est peut-être pas inéluctable au regard de l'évolution moins marquée depuis 2010.

D'autre part, la **domination sans partage des modes routiers** est visible dans le *Tableau 2*, avec une croissance de sa part modale qui s'est faite essentiellement au détriment du transport ferroviaire depuis les années 1990. En termes de trafic, le transport fluvial est resté à environ 7 Gtkm, alors que le fret ferroviaire a fortement diminué, en particulier durant les années 2000. Les trois dernières années et les bilans envisagés sur 2019-2020 soulignent un recours accru au mode routier pour le transport des marchandises.

Graphique 6 Évolution des trafics intérieurs de marchandises et du PIB, entre 1984 et 2018



Source : [1] [10].

Tableau 2 Évolution de la demande de transport intérieur de marchandises par mode entre 1990 et 2018

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Transport routier (Gtkm)	196	233	277	315	301	282	317
Part modale	*77 %*	*81 %*	*81 %*	*87 %*	*89 %*	*87 %*	*89 %*
Transport ferroviaire (Gtkm)	52,2	48,3	57,7	40,7	30	34,3	32
Part modale	*20 %*	*17 %*	*17 %*	*11 %*	*9 %*	*11 %*	*9 %*
Transport fluvial (Gtkm)	7,2	5,9	7,3	7,9	8,1	7,5	6,7
Part modale	*2,8 %*	*2 %*	*2,1 %*	*2,2 %*	*2,4 %*	*2,3 %*	*1,9 %*
TOTAL	**255**	**287**	**342**	**363**	**339**	**324**	**356**

Source : [1].

3. Des modalités de transport en pleine évolution

3.1. De nouvelles pratiques bouleversent la mobilité des voyageurs

STATISTIQUES 2015 EN RÉFÉRENCE

La **demande intérieure de transport de voyageurs** est estimée en 2015 pour le périmètre France métropolitaine à 952 milliards de passagers-kilomètres (Gpkm) et 1 137 Gpkm en tenant compte également du trafic aérien avec les départements et régions d'outre-mer (DROM) et les liaisons internationales (par convention les distances en demi-croisière). Ce dernier chiffre correspond à environ 17 680 km par an ou quasiment 50 km par jour et par personne en moyenne, en confondant les trajets de courte et de longue distance.

La répartition est dominée à plus de 70 % par le transport routier et notamment par les véhicules particuliers qui réalisent environ ⅔ des distances en France. Ils sont complétés par le train, qui représente 10 % des distances, et par l'aérien, qui représente 17,5 % des distances parcourues. Enfin, les modes actifs, dominés par la marche (pour les déplacements de proximité, ou en intermodalité avec les autres modes) et complétée par le vélo, représentent une proportion relativement importante des déplacements et des temps de transport, mais ne représentent que de l'ordre de 2 % des distances parcourues.

Les **carburants liquides** (pétrole avec une part modérée de biocarburants incorporés) constituent le vecteur énergétique privilégié de la majorité des modes de transport (voitures, deux-roues motorisés, bus et cars, avions), seuls les modes actifs et le ferroviaire échappant à cette règle, ce dernier mode consommant à 82 % de l'énergie électrique. Les émissions de la mobilité des voyageurs représentent environ les deux tiers des émissions des transports, soit de l'ordre de 20 % des émissions intérieures de la France.

TENDANCES ÉMERGENTES

La domination de la voiture dans la mobilité des voyageurs est remise en question par certaines tendances depuis plusieurs années. Tout d'abord, la motorisation des ménages est proche de la saturation. Elle est en augmentation dans les zones peu denses, mais elle décline dans le centre des grandes villes. Cette tendance pourrait se poursuivre et s'étendre dans les années à venir, à la fois vers la périphérie de ces villes et dans les villes moyennes, si les politiques de modération du trafic automobile s'étendent davantage à ces zones (vitesse à 30 km/h, contraintes sur le stationnement, aménagements favorisant la proximité et les modes actifs, etc.). L'image de la voiture chez les Français change : elle est moins associée à l'idée de liberté, en particulier chez les jeunes qui passent moins systématiquement, ou moins tôt, leur permis de conduire. Dans le même temps, **les nouvelles pratiques de mobilités émergentes se consolident**, selon l'étude de l'Observatoire des Mobilités Émergentes : 30 % des sondés ont eu recours au covoiturage sur les 12 derniers mois, 26 % utilisent le vélo pour des déplacements quotidiens ou réguliers hors loisirs ; l'usage des cars (19 %) et des VTC (véhicule de tourisme avec chauffeur, 16 %) est

Tableau 3 Structure détaillée par mode de la mobilité des voyageurs en 2015 (transport aérien pour les DROM et international inclus)

Modes	VP*	2RM**	Autocar	Bus	Train	Avion***	Marche	Vélo	TOTAL
Demande (Gpkm)	733,5	13,9	44,8	10,3	108	199,2	20	7,2	1 137
Km/jour/pers.	31,3	0,6	1,9	0,4	4,6	8,5	0,9	0,3	48,3
Part modale	***65 %***	***1,2 %***	***3,9 %***	***0,9 %***	***9,5 %***	***17,5 %***	***1,8 %***	***0,6 %***	***100 %***

* VP : voitures particulières.
** 2RM : deux-roues motorisés.
*** La demande de mobilité pour l'aérien sur la métropole seule représente 14,3 Gpkm, soit 0,6 km/jour/pers.

Sources : [1].

également en progression [11]. On assiste à un foisonnement de nouvelles offres, avec des succès variés et plus ou moins en substitution de la voiture individuelle.

On constate ainsi **un report vers les modes de transport alternatifs**, tels que les transports collectifs déjà en développement depuis de nombreuses années. De manière plus récente, le renouveau du vélo en ville et un certain regain d'intérêt pour la marche modifient les pratiques. En plus de ces modes historiques, se développent également les vélos en libre-service (VLS, avec ou sans bornes), les vélos à assistance électrique (VAE) ou diverses formes de micromobilités avec les EDPM (engins de déplacement personnel motorisés) comme les trottinettes, les gyroroues ou les skateboards.

D'autres offres se développent pour proposer **un usage différent et souvent plus partagé de la voiture**, sous des formes variées : en partageant le véhicule, avec l'autopartage ; en partageant les trajets avec le covoiturage et l'autostop ; par le transport à la demande, les taxis et VTC ; ou encore en développant des véhicules légers comme les minicitadines ou les quadricyles (comme les Citroën Ami et Renault Twizy). En couplant ces nouvelles offres de mobilité partagées avec les possibilités offertes par le numérique, le MaaS (*Mobility as a Service*) fait le pari de l'émergence d'une mobilité multimodale fluide associant les transports de masse et les nouvelles offres de niche pour des déplacements porte-à-porte facilités.

Pour ses promoteurs, cette perspective pourrait être facilitée à l'avenir par **l'introduction des véhicules autonomes**, bien que de nombreux freins soient encore à lever pour leur déploiement. Si l'avènement de véhicules individuels 100 % autonomes est aujourd'hui incertain, les progrès technologiques réalisés devraient au moins se matérialiser par des systèmes d'aides à la conduite de plus en plus sophistiqués et des offres de navettes autonomes devraient émerger sur des sites appropriés.

L'objectif de la **Loi d'Orientation des Mobilités** (LOM) du 24 décembre 2019 est notamment de créer un environnement favorable aux nouvelles mobilités pour diminuer l'autosolisme, en rendant les modes actifs et partagés plus attractifs. Les mesures de la LOM visent ainsi à faciliter l'émergence de solutions de mobilités diversifiées, adaptées aux besoins des habitants, au contexte territorial et co-construites localement.

Sur les **trajets longue distance**, des tendances récentes mettent en évidence des incertitudes sur le développement du trafic aérien. Les incertitudes concernent la relance suite à la crise de la Covid-19, l'avenir des projets d'agrandissements d'aéroports, les éventuels impacts de la « honte de prendre l'avion », ou l'interdiction de certaines lignes quand le report vers le train est possible, pour lesquels plusieurs hypothèses sont envisageables. En parallèle, le trafic routier de longue distance pourrait être impacté par une mesure de baisse de la vitesse maximale sur les autoroutes. Concernant le transport ferroviaire, les trains de nuit regagnent en intérêt, des lignes ouvrent à nouveau et l'ouverture à la concurrence pourrait amener de nouveaux acteurs sur le marché, tandis que les flottes ferroviaires sont progressivement renouvelées avec notamment pour objectif affiché par la SNCF de sortir du diesel à l'horizon 2035.

Au-delà des tendances précédentes qui émergent sur la demande de mobilité, des évolutions sont en cours sur les types de véhicules utilisés. Il s'agit notamment de la tendance des dernières décennies à la hausse du poids des véhicules *via* une montée en gabarit, une hausse de la taille et de la puissance des véhicules, mais aussi à l'installation de nombreux équipements de sécurité ou de confort, limitant les gains d'efficacité énergétique des véhicules. Plus récemment, c'est la **montée en puissance des ventes de SUV** (*Sport Utility Vehicles*) qui a de nouveau porté cette tendance, pour représenter de l'ordre de 40 % des ventes actuelles de véhicules [7]. En plus d'être plus lourds, ces véhicules sont aussi peu aérodynamiques, occupent davantage d'espace sur la chaussée et en stationnement et sont potentiellement plus dangereux (centre de gravité plus élevé, inertie et impact plus fort à la collision, zone de faible visibilité à l'aplomb).

On assiste à un foisonnement de nouvelles offres, avec des succès variés et plus ou moins en substitution de la voiture individuelle.

Des évolutions importantes émergent aussi sur les motorisations et en particulier sur le **marché de la voiture électrique**, démarré il y a une dizaine d'années, qui est resté inférieur à 2 % des ventes jusqu'en 2019. La dynamique de décarbonation du parc est bien moins engagée encore pour le transport aérien, pour lequel l'électrique est très peu adapté et les promesses d'avion à hydrogène seulement à l'horizon 2035. Les motorisations alternatives sont cependant en plus forte croissance pour les cyclomoteurs (13 % électriques en 2018) et les autobus (15 % au GNV et 4 % à l'électrique ; [1]).

Par ailleurs, l'entrée en vigueur en 2020 des normes européennes sur les polluants a tiré à la hausse l'électrification des véhicules particuliers, à environ 6 % des immatriculations pour les voitures électriques et 4 % pour les hybrides rechargeables [9]. Cette dynamique va certainement se confirmer dans les années à venir avec l'objectif français d'interdiction de vente de véhicules légers émettant des gaz à effet de serre en 2040 ainsi que la mise en œuvre des ZFE (Zone à Faibles Émissions) pour l'ensemble des agglomérations de plus de 150 000 habitants. Les politiques publiques incitatives (bonus écologiques et primes à la conversion), la volonté des constructeurs, les progrès sur les batteries (miniaturisation et plus grande autonomie) ou encore le développement d'un réseau permettant leur recharge devraient être structurants sur les tendances à venir. Les **bénéfices climatiques de l'électrification** seront plus importants si celle-ci est pensée en interaction avec des évolutions vers plus de sobriété : véhicules plus légers, poids des batteries limité, en lien avec une modération des distances de déplacement, gestion intelligente de la recharge ou encore baisses de vitesse sur les réseaux routiers. Ces évolutions sont à ce jour plus incertaines, car peu prises en considération dans les politiques incitatives en place.

3.2. Une transition plus lente dans le transport de marchandises

STATISTIQUES 2015 EN RÉFÉRENCE

Le transport de marchandises représente **323 milliards de tonnes-kilomètres** (Gtkm) de fret. Il est réalisé très majoritairement par la route (88 %), tandis que le fret ferroviaire représente 10 % des flux et le fluvial opère les 2 % restants (*cf.* ***Tableau 2*** sur les tendances sur la période 1990-2018).
Les données de flux n'étant pas disponibles pour le transport maritime, il n'est pas inclus dans ces parts modales et seuls les transports intérieurs de marchandises sont ici détaillés, comme cela est généralement le cas dans les inventaires nationaux [1].

Comme précédemment, le mode routier dominant, le recours aux carburants liquides est massif avec l'utilisation quasi exclusive du diesel.

Concernant les émissions, les poids lourds représentent 21 % des **émissions des transports** intérieurs (29 $MtCO_2$ environ en 2015), tandis que les VUL représentent 19 % des émissions (26 $MtCO_2$; [2]). Une partie de ces VUL ayant un usage privilégié pour du transport de passagers, le transport de marchandises représente environ un tiers des émissions des transports. Cependant, dans le chiffrage des scénarios transport, l'ensemble des VUL est ici quantifié comme du transport routier de marchandises. En comparaison du routier, les émissions du fluvial et du ferroviaire sont très faibles, tandis que le transport maritime domestique et international représente 6,6 $MtCO_2$ au total.

TENDANCES ÉMERGENTES

Les **tendances observées et signaux faibles** pour les transports de marchandises sont présentés ci-après, en précisant les évolutions possibles pour les acheminements sur de longues distances dans un premier temps et pour les livraisons de proximité dans un second temps.

TRANSPORT DE MARCHANDISES INTERURBAIN (LONGUE DISTANCE)

Sur les transports internationaux, un accord a été conclu au sein de l'Organisation maritime internationale (OMI) en 2018, visant à réduire de 50 % les émissions de CO_2 des navires entre 2008 et 2050. Si cet objectif est en dessous de la trajectoire de l'accord de Paris, il présente également l'inconvénient de ne pas être accompagné des mesures nécessaires pour assurer la décarbonation de ce secteur, qui représente 3 % des émissions mondiales [12].

Tableau 4 *Structure détaillée par mode de la demande intérieure de marchandises en 2015*

	Poids lourds	VUL	Fluvial	Train	TOTAL
Volume de fret en 2015 (Gtkm)	258,1	23	7,5	34,3	323
Part modale	***80 %***	***7,1 %***	***2,3 %***	***10,6 %***	***100 %***

Source : [1].

En matière de demande de transports sur le territoire national, se développent les circuits courts d'approvisionnement, en particulier pour les produits alimentaires en lien avec l'évolution des modes de vie et l'attrait pour des productions locales, en agriculture biologique ou en signes de qualité, en limitant les consommations de produits carnés, etc. Cette tendance à la relocalisation progresse plus timidement pour des produits non alimentaires, avec notamment le développement du « made in France », des flux de matières moins nombreux (réparabilité, réutilisation…) et plus courts (recyclage) et de la consommation responsable, aussi bien d'un point de vue social qu'environnemental.

Sur le **report modal**, la part du ferroviaire est fluctuante. Les nombreux plans de relance du fret ferroviaire n'ont pas réussi à produire des effets durables jusqu'à présent. Les solutions fluviales connaissent une croissance pour certains segments de marché, car elles s'avèrent pertinentes pour l'acheminement de marchandises sans contrainte de flux tendus, comme les matières premières pondéreuses et non périssables.

La tendance des dernières années est à une amélioration du **taux de chargement** des véhicules routiers. Celle-ci pourrait éventuellement continuer grâce à des progrès logistiques permis par l'essor des plateformes numériques et le regroupement des chargements (diminution des retours à vide, massification des flux, mutualisation), bien que la tendance à la hausse semble proche d'atteindre un seuil.

Le meilleur remplissage permet des progrès sur l'**efficacité** des transports routiers de marchandises par unité transportée (énergétique et donc économique), par une optimisation des parcours et des phases de conduite par le déploiement de véhicules plus connectés (applications embarquées de suivi de flotte, information routière en temps réel et analyse de conduite).

Enfin, pour le facteur d'**intensité carbone**, le recours à des technologies faiblement carbonées est encore largement à développer, selon les distances et les domaines d'applications les plus adaptés. Le champ des possibles est large, avec les offres électriques, rechargeables, des solutions GNV (sous forme liquide GNL ou gaz comprimé GNC) incorporant le biogaz, le recours aux biocarburants ainsi que le vecteur hydrogène. La décarbonation du parc est cependant très peu entamée jusqu'à présent. En 2018, c'est seulement 2 % des ventes de poids lourds qui fonctionnaient au GNV. La proportion est encore plus faible pour l'électrique, avec 0,03 % des ventes de camions (hors tracteurs routiers ; [1]). En revanche, la proportion des véhicules électriques est de 1,7 % pour les VUL, une technologie particulièrement adaptée pour des usages avec des distances et un poids à transporter relativement limités.

Ces tendances sur l'organisation logistique et la pénétration des motorisations alternatives sont portées par la prise de conscience émergente sur l'impact des pratiques des clients et consommateurs, accompagnée par les obligations d'affichage de l'impact carbone des prestations de transports de marchandises, et par les actions des acteurs de la filière au travers d'engagements volontaires.

TRANSPORT DE MARCHANDISES COURTE DISTANCE

Les **livraisons en ville** sont influencées par l'évolution de la nature des activités, en lien avec la tertiarisation de l'économie, impliquant une plus forte place des bureaux et moins d'activité logistique lourde (industrie, commerces de gros, entrepôts). Le recours aux transporteurs professionnels (compte d'autrui, à l'inverse du compte propre) augmente et il est propice à une optimisation des flux et des performances (économiques et potentiellement environnementales), avec par exemple le déploiement d'espaces logistiques urbains pour améliorer les livraisons du dernier kilomètre.

Une augmentation des **services de livraison avec des délais courts** est observée et pourrait être accélérée par la crise de la Covid-19 qui profite au e-commerce. Ainsi se sont développées des offres de livraison en moins de 24 heures, jusqu'au concept de livraison instantanée (« instant delivery »), promettant un acheminement en moins de 2 heures dans les métropoles.

Couplé aux problématiques de congestion en ville et aux politiques de modération du trafic motorisé, le e-commerce explique également l'utilisation en forte croissance des VUL. Avec un poids total autorisé en charge inférieur à 3,5 tonnes, les VUL peuvent représenter des parts importantes du trafic, car adaptés d'une part à des chargements standardisés (palettes) et d'autre part à un usage en centre urbain dense (petite taille). Ces véhicules seront vraisemblablement plus facilement électrifiés que les poids lourds, étant donné les moindres charges et les distances plus faibles qu'ils parcourent et qui permettent plus facilement d'avoir une autonomie suffisante. Le recours à des modes de livraison urbains avec de faibles chargements peut aussi profiter à la cyclologistique, qui prend une place croissante dans la livraison ces dernières années grâce à son coût d'exploitation encore plus faible que celui des scooters : livraison de repas, intermodalité avec les modes lourds en assurant la logistique du dernier kilomètre en vélos cargos, déménagements ou encore utilisation du vélo cargo par des entrepreneurs à vélo.

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios

Le périmètre des analyses sur le transport de voyageurs et de marchandises est le suivant :

- **temporel** : les données de références sont prises à 2015, projetées à 2050, avec un point de passage à 2030 et tous les cinq ans ensuite. Pour certaines quantifications, telles que la diffusion des nouveaux véhicules dans le parc, un pas de temps d'un an a été considéré ;

- **géographique** : l'objectif de neutralité carbone est fourni à l'échelle de la France métropolitaine, c'est-à-dire sans les transports avec les DOM-COM, ni les transports internationaux aériens et maritimes. Ces données sont cependant quantifiées aussi et apparaissent dans de nombreux graphiques de demande voyageurs ou dans les analyses sur les besoins énergétiques de ce chapitre ;

- **variables et sorties utilisées** : en lien avec les cinq leviers de décarbonation des transports, les principales données utilisées sont celles de demande de transport (en passagers-kilomètres ou tonnes-kilomètres), le remplissage moyen des véhicules, les consommations d'énergie et les émissions. Ces données sont séparées par mode de transport et par type de véhicule. Les émissions comptées dans le secteur des transports sont uniquement les émissions de CO_2 directes liées à la combustion des combustibles fossiles, sans inclure les émissions de combustion de la biomasse, les émissions liées à la production de l'énergie, des véhicules ou des infrastructures, qui sont comptées dans d'autres secteurs ou correspondent à des émissions importées ;

- **modes de transport** : pour le transport de voyageurs, les modes considérés sont les voitures particulières (VP), les deux-roues motorisés (2RM), les bus et cars, le vélo et modes assimilés (vélos à assistance électrique, vélos cargos, vélos pliants, vélomobiles, speedélecs, autres engins de déplacements personnels motorisés), la marche, le transport aérien, ainsi que le ferroviaire. Les quantifications sont séparées entre courte et longue distance (la limite étant considérée à 80 km du domicile, à vol d'oiseau) et des détails sont apportés pour certains modes (entre activités pour le train ; trajets en Métropole, avec l'Outre-mer ou à l'international pour l'aérien). Pour le transport de marchandises, les modes considérés sont les poids lourds (PL), les véhicules utilitaires légers (VUL), le ferroviaire, le fluvial, ainsi que le maritime. Les poids lourds sont séparés entre articulés et rigides et les utilitaires entre grands et petits VUL. Les autres modes (cyclologistique, aérien, drones, robots livreurs…) sont intégrés dans les récits sans être quantifiés dans la demande totale ;

- **énergies prises en compte** : les produits d'origine fossiles dérivés du pétrole (gazole, essence, kérosène, fioul lourd, etc.) et du gaz naturel, ainsi que leurs substituts que sont les biocarburants liquides, les électro-carburants (e-fuels) et le biogaz, l'électricité et l'hydrogène.

Selon les thèmes, différents éléments sont pris en compte dans les quantifications des scénarios :

Tableau 5 Éléments pris en compte pour la quantification des hypothèses des scénarios

	Méthodologie	Points d'attention
Récits contrastés des 4 scénarios	Reprise de visions de la société, signaux faibles	Réalisme des visions, cohérence des scénarios
Tendances passées et récentes	Rétrospective, prolongement des tendances	Ruptures, phénomènes de saturation
Études existantes/bibliographie	Reprise de chiffres, hypothèses, prévisions	Comparaison de différentes sources
Exemples en France et à l'étranger	Politiques publiques en place, potentiels de déploiement	Difficultés de comparaison directe, de généralisation

Les éléments les plus structurants correspondent au lien avec les récits globaux de transition, afin d'assurer **la cohérence globale des scénarios** avec les autres secteurs, ainsi que les récits plus précis sur les mobilités et les transports, qui seront détaillés dans la prochaine section. Ces derniers sont repris à partir des visions variées de la société et des politiques publiques à mettre en œuvre pour la mobilité et les transports, ainsi que des tendances récentes ou signaux faibles visibles.

Aussi les hypothèses d'évolutions s'appuient-elles sur **les tendances passées** identifiées dans la partie de rétrospective, pour éventuellement prolonger ces tendances ou prévoir des ruptures en cohérence avec les récits des scénarios, ou des phénomènes de saturation (des infrastructures, de diffusion d'un mode, de ressources disponibles, etc.) par rapport aux tendances passées.

La **littérature existante** est aussi précieuse pour projeter les évolutions, aussi bien les études de l'ADEME, les scénarios de prospectives existants, la littérature scientifique et grise, les projections économiques, les enquêtes sociologiques, qui peuvent être des sources d'inspiration pour les récits ou certains chiffrages.

Enfin, **des exemples en France ou à l'étranger** de territoires en avance sur certains aspects de la transition ont pu servir afin d'identifier des politiques publiques possibles ou des potentiels de développement de certains leviers de transition (ex. : diffusion du vélo ou de la voiture électrique, fiscalité et régulation, etc.).

Pour évaluer l'évolution de la demande au total et par mode pour la mobilité des voyageurs, les quantifications sont réalisées d'une manière macroscopique sans recours à un modèle d'estimation de trafic, à partir de l'évolution des critères suivants :

- **les kilomètres parcourus, au total et par mode** : ils ont eu historiquement un impact très fort sur la croissance des consommations d'énergie jusqu'au tournant du millénaire. Les kilomètres parcourus par personne sont depuis relativement constants en France et en légère croissance tendancielle si on prend en compte l'aérien international ;

- **le nombre de déplacements** : historiquement, ils sont de l'ordre de 3 à 4 trajets par jour et par personne. Dans les scénarios, ils peuvent légèrement évoluer à la hausse ou à la baisse, selon les tendances identifiées dans les modes de vie, l'évolution des moyens de communication, du télétravail, du e-commerce ou des autres activités réalisées à distance *via* les outils numériques, l'évolution des loisirs, des relations sociales ou des comportements de consommation et d'achat ;

- **les temps des trajets** : ils sont relativement constants autour d'une heure par jour et par personne, et témoignent de la place des transports dans les modes de vie et l'organisation du temps.

Aussi, les quantifications sur ces trois variables sont prises en cohérence avec l'évolution des déterminants qui permettent de passer de l'une à l'autre de ces caractéristiques des comportements de mobilité :

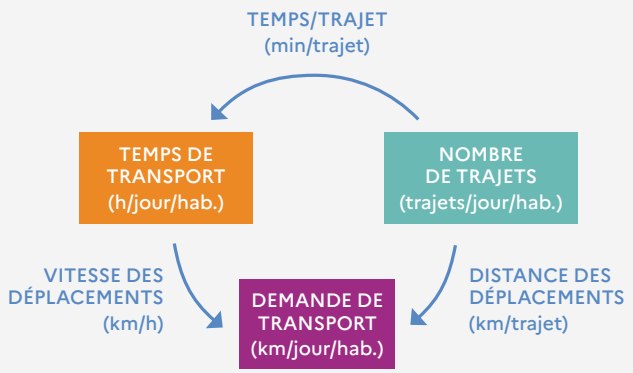
- **la distance** moyenne par trajet, qui dépend notamment de l'aménagement du territoire (répartition de la population sur le territoire, choix de localisation des activités, etc.) ou encore des modes de vie et des pratiques sociales dominantes ;

- **la durée** moyenne des trajets, généralement proche de 15-20 minutes par mode de transport pour la courte distance et restant généralement proche de cet ordre de grandeur au cours du temps. Sur la longue distance, les trajets sont en moyenne de l'ordre de 3 à 4 heures par mode ;

- **la vitesse** des déplacements, au total (rapport entre kilomètres et temps de transport totaux), par mode de transport et avec des détails pour certains modes, tel qu'évoqué plus haut. Cette vitesse varie fortement selon les modes utilisés et conditionne aussi fortement la portée des différents déplacements, puisque la durée de déplacement des différents modes est proche. En prospective, la vitesse moyenne de certains modes peut varier selon les évolutions technologiques, les types de véhicules développés, les politiques de sécurité routière, la qualité, la régulation et la saturation des infrastructures (aussi bien routières que ferroviaires).

Si le détail est important sur les caractéristiques des déplacements et les modes de transport utilisés, ces données restent ici à un niveau agrégé sur l'ensemble de la population. Ainsi les quantifications ne sont-elles pas détaillées selon les motifs de déplacement, les territoires, l'âge, le genre, le revenu, la catégorie socio-professionnelle, le nombre de personnes dans le ménage, la motorisation des ménages, l'offre de transport ou les aménagements à proximité, ou encore les habitudes de mobilité. Cependant, les évolutions de ces critères, qui peuvent être des déterminants importants des comportements de mobilité, sont présentes dans les récits des scénarios et expliquent indirectement les évolutions prévues pour les chiffres agrégés. Ces hypothèses pourront être complétées ou adaptées à l'avenir quand les résultats détaillés de l'enquête mobilité des personnes 2018-2019 (les derniers datant de 2008) seront disponibles. Ce n'était pas le cas au moment des quantifications de ces scénarios bien que nous ayons pu prendre en compte les tout premiers résultats partiels [5].

Figure 2 Variables prises en compte dans la quantification de l'évolution de la demande de mobilité



Source : [4].

Pour le transport de marchandises, l'évolution de la demande a été réalisée en séparant les trafics en quatre catégories de marchandises – en regroupant différentes catégories de nomenclature statistique des transports (NST), d'après les données des comptes et mémentos des transports [1] [13] :

- **matériaux de construction**, qui regroupent les métaux de base, produits métalliques et autres produits minéraux non métalliques (NST 9 et 10) ;
- **produits manufacturés**, qui comprennent notamment les textiles, matériels de transport, meubles et les marchandises groupées (NST 5, 11, 12, 13, 16, 18 et 19) ;
- **produits agricoles et alimentaires**, incluant les produits de la chasse, de la forêt et de la pêche, les boissons et le tabac (NST 1 et 4) ;
- **minerais et produits industriels**, qui regroupent de nombreuses catégories NST (2, 3, 6, 7, 8, 14, 15, 17 et 20), avec notamment les produits énergétiques fossiles et les minerais.

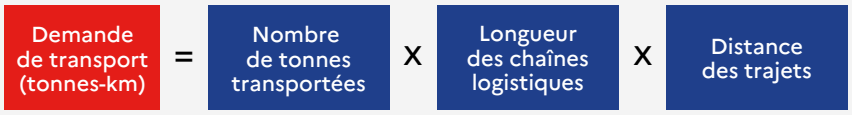
Cette décomposition s'appuie sur les travaux de décomposition de la demande de marchandises réalisés par l'IDDRI [14] lors de ses scénarios de décarbonation du fret en France. Leur segmentation en six catégories a été simplifiée en quatre catégories, en regroupant les produits manufacturés de faible et haute valeur ajoutée, ainsi que les déchets industriels avec la catégorie des produits industriels.

Pour évaluer l'évolution de la demande de transport de marchandises pour ces différentes catégories et en déduire l'évolution de la demande totale, des évolutions contrastées sont prévues selon les scénarios sur les trois critères suivants :

- **les quantités de produits à transporter** : celles-ci peuvent être influencées par des consommations ou des politiques de sobriété plus ou moins fortes des différentes branches de l'économie, telles que la construction neuve, les ventes de véhicules ou les biens de consommation. Ainsi, ces quantités sont fortement influencées par les évolutions prévues dans les autres secteurs de l'économie (cf. chapitres *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*, *2.2.3. Production industrielle* et *2.1.4. Alimentation*) ;
- **la longueur des chaînes logistiques** : un même produit ou une même tonne de marchandises peuvent être transportés plusieurs fois avant d'arriver jusqu'au canal de distribution ou au consommateur final, en ayant éventuellement subi des transformations entre les différents transports. Le développement de circuits courts dans l'alimentation peut par exemple participer à raccourcir les chaînes logistiques sur les produits agricoles et alimentaires ;
- **la distance moyenne des trajets** : les distances parcourues par les tonnes transportées peuvent évoluer à la hausse ou à la baisse, selon les éventuelles évolutions de relocalisation de l'économie à une échelle plus locale, le type de marchandises transportées ou l'adéquation entre les lieux de production, de transformation et de consommation.

Cette demande totale et selon les catégories de marchandises est également détaillée selon les différents modes considérés pour le transport intérieur de marchandises. Cette modélisation des besoins de transport de marchandise est donc plus approfondie par rapport aux précédents exercices prospectifs de l'ADEME, qui étaient uniquement basés sur une évolution dépendante du PIB.

Figure 3 Variables prises en compte pour quantifier l'évolution de la demande de transport de marchandises



Pour l'évolution des motorisations par mode de transport et type de véhicules, les choix prennent en compte à nouveau de nombreux éléments en compte, dont il est possible de citer en particulier :

- **les avantages et inconvénients des différentes technologies**, notamment parmi les motorisations électriques, l'utilisation du vecteur hydrogène, les carburants liquides (dont les biocarburants ou encore les carburants de synthèse) ou gazeux avec le GNV (dont le bioGNV). Ces avantages et inconvénients portent sur de nombreux critères, tels que les coûts, la densité énergétique, les ressources disponibles, la maturité technologique ou encore la facilité d'utilisation. Ces critères peuvent fortement évoluer au cours du temps, tel que cela peut être attendu sur les technologies de batteries ou la maturité de la production d'hydrogène ;

- **les tendances en cours** ont été également prises en compte, que ce soit sur **les politiques publiques** (telles que l'objectif de fin de vente des véhicules thermiques à 2040), les annonces des constructeurs, ou encore les évolutions du marché ;

- **les interactions avec les secteurs producteurs d'énergie** : afin d'assurer la cohérence globale des scénarios entre offre et demande énergétique, le bouclage avec les autres secteurs de la transition écologique ont été nécessaires, pour évaluer les énergies disponibles, à privilégier ou éviter dans les transports (liens avec les chapitres *2.3.1. Mix gaz*, *2.3.4. Carburants liquides*, *2.3.5. Hydrogène* et *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*).

Par ailleurs, pour les véhicules routiers, les évolutions des immatriculations ont été calculées avec un outil interne simplifié à un pas d'un an pour évaluer la pénétration des motorisations dans le parc, ainsi que les volumes des parcs et les circulations en cohérence avec les niveaux de trafics routiers. Pour les voitures, une différenciation selon la taille et le poids des véhicules a également été réalisée, en raison de l'impact de ces critères notamment sur la consommation d'énergie et de ressources et sur les niveaux d'investissements.

Afin de compiler les données de demande de transport, de remplissage, d'efficacité et de mix énergétique par mode de transport et par type de véhicule considéré et d'obtenir les sorties et quantifications souhaitées, un outils d'agrégation a été utilisé : l'outil GEStime dans un premier temps, puis un autre outil dans un second temps.

Aussi une décomposition adaptée aux transports de voyageurs et de marchandises est-elle utilisée pour suivre l'évolution des émissions de CO_2 au regard de la contribution des cinq leviers de décarbonation cités plus haut. Les résultats sont présentés au début de la description de chaque scénario dans la prochaine section (la méthodologie de calcul utilisée est détaillée dans [4]).

Enfin, de nombreux travaux transverses, pour partie présentés dans la suite du rapport, ont été conduits en parallèle des quantifications évoquées ci-dessus. Ils ont permis d'enrichir la réflexion sur ces chiffrages et de mieux comprendre les implications des scénarios modélisés. Les éléments de réflexion et les résultats seront également évoqués dans le cahier d'hypothèses publié dans un deuxième temps en complément du présent document. Les principaux exercices transverses en lien avec les transports sont les suivants :

- **analyse de cycle de vie et ressources** : quantifications matières du secteur des transports ; appréciation des émissions en analyse de cycle de vie des transports ; évaluation qualitative des impacts sur la biodiversité et analyse quantitative de l'artificialisation des sols des scénarios ;

- **modes de vie** : récits sur les modes de vie et leur lien avec les comportements de mobilité ; lien entre les évolutions du système alimentaire et le transport de marchandises avec le projet SISAE (Simulation prospective du Système Alimentaire et de son Empreinte carbone) ;

- **adaptation au changement climatique** : détails des principaux impacts du changement climatique sur le secteur des transports et stratégies privilégiées selon les scénarios ;

- **économie** : modélisation macroéconomique des scénarios ; évaluation des principaux investissements nécessaires dans les scénarios, pour les véhicules et les infrastructures ; contribution aux travaux sur les prospectives en termes d'emplois de plusieurs filières, en particulier la logistique des derniers kilomètres, les carburants liquides et gazeux, puis la plasturgie en tant que sous-traitant de l'industrie automobile.

5. Les scénarios divergent surtout sur la demande de transport

Selon les scénarios, chacun des **cinq leviers de décarbonation des transports** (demande de transport, report modal, remplissage des véhicules, efficacité énergétique et décarbonation de l'énergie) est plus ou moins fortement sollicité. Ces différentes intensités sont représentées dans le *Tableau 6* par la quantité de + attribuée à chacun d'entre eux. Par exemple, dans S1, la priorité de l'action porte sur la modération de la demande de transport, ce qui signifie ici un objectif de réduction du nombre de kilomètres parcourus par les voyageurs et une réduction des trafics pour les marchandises.

Les premiers leviers qui agissent davantage sur la demande de mobilité et de fret sont fortement sollicités dans S1 et S2, tandis que la demande est moins contrainte à mesure que l'on s'approche de S4, qui repose plus sur un pari technique permettant d'assurer autant voire plus de déplacements avec peu de rejets de GES. Au contraire, les leviers technologiques – nécessaires dans tous les scénarios pour décarboner les mix énergétiques des transports – y sont davantage sollicités.

Tableau 6 Sollicitation des cinq leviers de décarbonation dans les scénarios

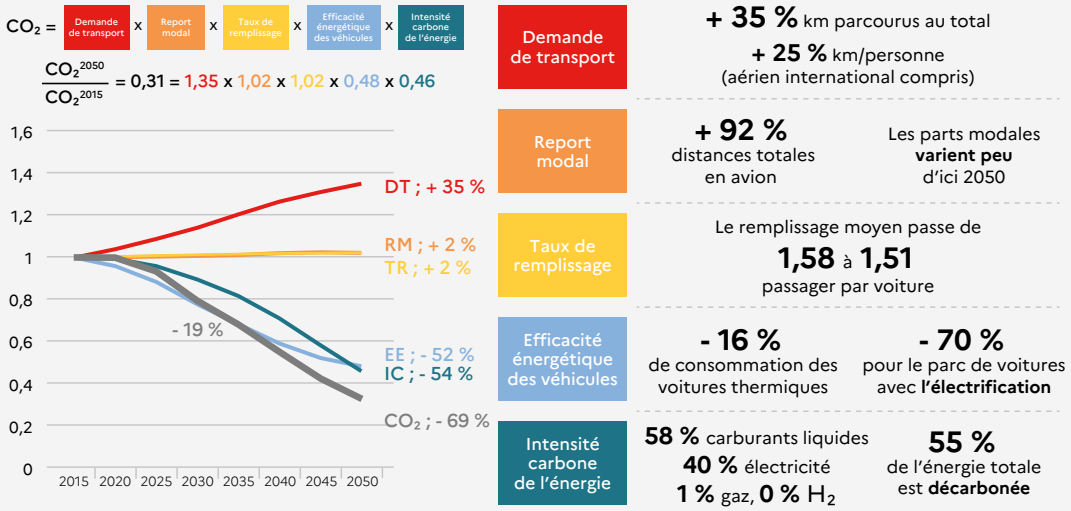
	TEND	S1	S2	S3	S4
Modération de la demande	+	++++	+++	+	
Report modal	++	+++	++++	++	+
Remplissage	+	+++	+++	++	+
Efficacité	+	++	+++	++++	+++
Décarbonation	++	++	+++	++++	++++

5.1. Scénario tendanciel : une décarbonation insuffisante, surtout côté marchandises

Le scénario tendanciel projette l'évolution probable des leviers de décarbonation des transports au vu des tendances actuelles à l'œuvre. Il correspond pour partie à une prolongation de certaines tendances passées et pour une autre partie à certaines évolutions déjà enclenchées actuellement. Certains objectifs de politiques publiques peuvent être intégrés s'ils sont assortis de moyens suffisants pour les atteindre. En revanche, la neutralité carbone n'est pas atteinte, en raison d'un volontarisme insuffisant sur les leviers de la transition.

MOBILITÉ DES PERSONNES

Graphique 7 Résumé des principales évolutions de la mobilité des personnes du scénario tendanciel, entre 2015 et 2050



Périmètre des chiffres voyageurs : chiffres présentés à 2050 (et variations par rapport à 2015) ; les chiffres incluent le transport aérien international.
Lecture : les émissions baissent de 69 % (facteur 0,31 en haut) entre 2015 et 2050, ce qui s'explique par la multiplication des contributions des 5 facteurs, dont certains jouent à la hausse sur les émissions (comme la demande, + 35 %) et d'autres à la baisse (comme l'efficacité, - 52 % ou facteur de 0,48 dans l'équation).

DEMANDE

Un objectif de croissance qui faiblit néanmoins

La demande de transport est vue comme un facteur positif. Elle est liée au développement de l'activité économique et des possibilités de mobilité des citoyens. Les distances parcourues par personne sont ainsi en légère hausse, essentiellement sur la longue distance, avec des hausses plus limitées sur la courte distance qui sont dues à une poursuite des dynamiques de métropolisation et d'étalement urbain. Si l'État continue à soutenir l'offre par la création d'infrastructures, notamment les extensions d'aéroports, les aménagements routiers et ferroviaires, le rythme de construction ralentit toutefois. Pour limiter les dépenses, les soutiens publics sont également en baisse pour les transports collectifs peu fréquentés qui voient une dégradation de leur qualité de service et de leur offre. Les politiques de régulations sont minimales : taxe carbone faible, peu d'anticipation et de politique d'adaptation au changement climatique et des inégalités croissantes tant sur le plan géographique, économique que social.

REPORT MODAL

Un report modal faible au global

La part modale des différents modes de transport varie relativement peu d'ici 2050, dans un contexte de croissance des trafics de la majorité des modes. Celle de l'automobile reste prépondérante hormis dans les centres des grandes villes qui voient un développement soutenu du vélo et des engins de déplacement personnels motorisés. Sur la longue distance, les différents modes sont en augmentation, avec une croissance plus soutenue pour le transport aérien, en particulier pour les déplacements de loisirs à l'international.

REMPLISSAGE

Les évolutions des remplissages des véhicules s'estompent progressivement

Pour les trajets longue distance, le covoiturage poursuit sa croissance, en particulier auprès des populations les plus jeunes et les moins fortunées. Sur **la courte distance, les systèmes de covoiturage n'ar-**

rivent pas à s'imposer et leur impact reste anecdotique sur les remplissages moyens des véhicules. Au-delà de ces développements, les facteurs historiques de baisse du remplissage moyen des véhicules, tels que la baisse du nombre de personnes par ménage et la hausse de la motorisation des ménages, s'estompent progressivement, entraînant une stagnation du remplissage moyen des voitures. Peu d'évolutions significatives sont à signaler sur les autres modes de transport de voyageurs.

EFFICACITÉ

Des gains *via* l'électrification, une baisse des progrès sur les moteurs thermiques

Les progrès en matière d'efficacité énergétique sont essentiellement permis par l'électrification partielle (hybridation) ou totale des motorisations. En effet, les chaînes de tractions électriques sont intrinsèquement plus efficientes que les motorisations thermiques et permettent de limiter les consommations d'énergie de la mobilité. En revanche, **le poids des véhicules est à la hausse**, sous l'effet de cette même électrification au travers du volume de batteries installées et de la hausse des gabarits des véhicules, ce qui a tendance à limiter les gains d'efficacité, notamment pour les véhicules thermiques sur le début de la période.

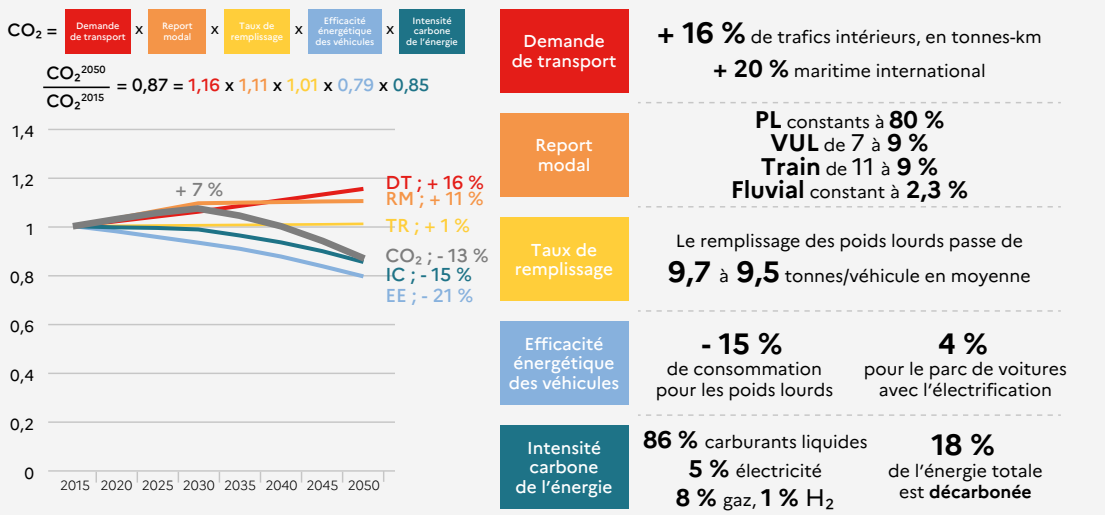
DÉCARBONATION

Des gains par l'électrification des voitures, une faible décarbonation ailleurs

La fin de vente des véhicules émettant des gaz à effet de serre en 2040 est inscrite dans la loi et incite les constructeurs automobiles à se tourner vers la voiture électrique. Cette démarche est accélérée par les mesures du paquet climat en discussion au sein de l'UE (cible de réduction de 55 % des émissions de GES d'ici 2030, interdiction de vente avancée en 2035). Cependant, la transition s'effectue lentement avec une tolérance pour la vente d'hybrides rechargeables pendant encore 5-10 ans afin de limiter les impacts sociaux et économiques. Faute d'un engagement fort de l'État et des acteurs pour déployer les infrastructures de recharge et étendre l'offre de véhicules, certaines cibles sont difficilement voire non atteintes. **De nombreux véhicules dépendent donc des carburants liquides**, notamment pour les ménages les moins fortunés, les trajets en voiture sur longue distance ou les autocars. Les biocarburants, qui s'appuient encore en grande majorité sur la première génération (à partir de cultures en concurrence avec les usages alimentaires) et peu sur les biocarburants avancés (à partir de coproduits et/ou de déchets), peinent à décarboner les carburants liquides, qui restent largement majoritaires pour le transport routier et le transport aérien. Les vecteurs gaz et hydrogène ne se développent quasiment pas pour la mobilité des voyageurs, hormis pour les transports en commun routiers.

TRANSPORT DE MARCHANDISES

Graphique 8 *Résumé des principales évolutions du scénario tendanciel marchandises, entre 2015 et 2050*



Périmètre des chiffres marchandises : transports intérieurs, sauf pour les chiffres d'intensité carbone qui incluent le maritime international.
Dans la décomposition Kaya, la contribution haute du report modal s'explique par la hausse de la proportion de VUL dans les trafics.
PL : poids lourds, VUL : véhicules utilitaires légers.

DEMANDE

Les trafics en légère hausse d'ici 2050

Les flux de marchandises sont en hausse modérée en tendanciel, fluctuant selon les évolutions de l'activité économique. Les quantités transportées, la longueur des chaînes logistiques ainsi que les distances moyennes parcourues ne subissent pas d'évolutions majeures au global, malgré quelques tendances contrastées selon les types de marchandises. La principale tendance réorganisant les flux logistiques correspond à la **croissance du e-commerce**, tandis que le numérique prend également de plus en plus de place dans l'organisation de ces flux.

REPORT MODAL

Le trafic routier et le maritime restent prédominants dans les échanges

Pour les trafics intérieurs, le transport routier reste prédominant, avec un recours croissant aux véhicules utilitaires légers pour le e-commerce et en particulier pour la livraison des ménages à domicile. La part modale du ferroviaire baisse légèrement alors que les trafics sont stables. Au sein des trafics internationaux, le maritime reste dominant, avec également une proportion croissante des flux de biens à forte valeur ajoutée ou avec des délais courts qui passent par le transport aérien.

REMPLISSAGE

Les hausses des remplissages des véhicules s'estompent progressivement

Pour tous les modes de transport, les hausses historiques du remplissage moyen des véhicules (poids lourds, trains de fret, navires) ralentissent progressivement, en raison de la saturation de la hausse de la taille des véhicules, qui avait porté l'augmentation des tonnes transportées.

EFFICACITÉ

Peu de gains obtenus sur les véhicules

Alors que l'électrification sur les voitures permet d'améliorer leur efficacité, les transports lourds sont bien moins électrifiés et ont donc des gains d'efficacité très modérés, en raison de l'approche des limites sur les gains énergétiques des moteurs thermiques.

DÉCARBONATION

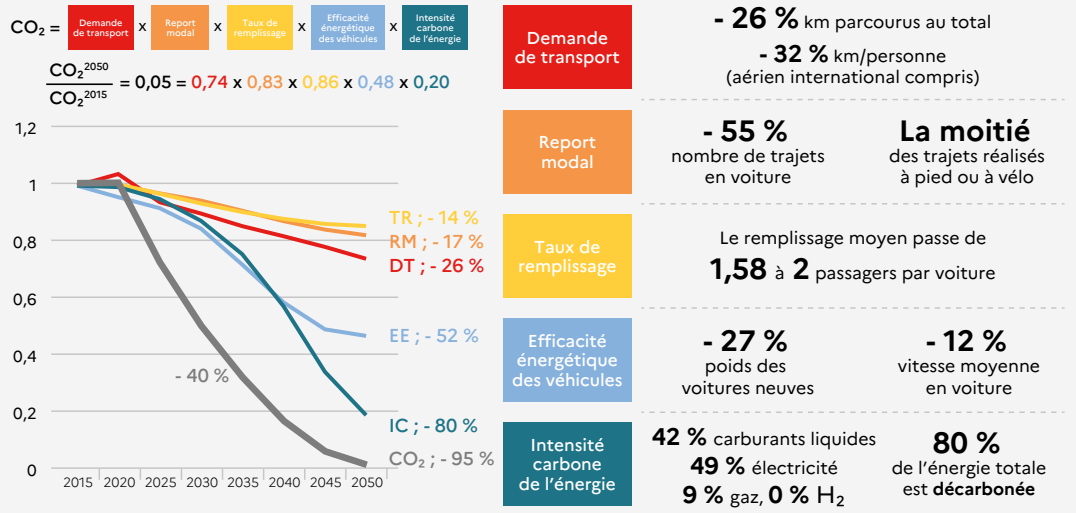
Le pétrole reste dominant pour le transport de marchandises

La décarbonation est très faible en tendanciel pour le fret. Seuls les utilitaires légers sont électrifiés en partie, tandis que le vecteur gaz se développe surtout sur les poids lourds et le transport fluvial, mais dans des proportions qui restent faibles et avec une proportion de gaz fossile qui reste largement dominante. L'hydrogène se développe très peu et n'apporte pas de contribution significative à la décarbonation.

5.2. Scénario 1: une baisse de la demande importante

MOBILITÉ DES PERSONNES

Graphique 9 Résumé des principales évolutions du scénario 1 voyageurs entre 2015 et 2050



Ce scénario est caractérisé par la recherche de sobriété dans les mobilités. Les citoyens et usagers ont toute leur place dans la définition des transformations des pratiques de mobilité à mener, avec une logique de « moins, c'est mieux ».

DEMANDE

La démobilité et la proximité deviennent des objectifs à poursuivre

Le premier **levier de la modération de la demande de transport** est celui sur lequel les plus fortes évolutions sont envisagées. Partant du constat que les distances parcourues sont un déterminant fort des consommations d'énergie et des émissions de CO_2 de la mobilité, la baisse de ces distances est généralement perçue positivement. Elle structure les politiques d'aménagement du territoire, de mobilité, ainsi que les comportements. La **démobilité** (soit la réduction du poids des déplacements), la **proximité** ou encore le **ralentissement** sont également valorisés, et perçus comme un idéal de mode de vie.

Les **déplacements les plus longs du quotidien sont ciblés en priorité** : ce sont les déplacements à réduire, voire à supprimer au plus vite. Pour ce faire, cette nouvelle direction à prendre consiste à agir sur les politiques d'emploi (proximité recherchée à l'embauche, télétravail, propositions d'échanges de lieux de travail entre employés pour les employeurs multi-sites, tiers-lieux, etc.), de faciliter les déménagements pour rapprochement domicile-travail et de relocaliser des activités. Lorsque ce n'est pas possible, le train, les autocars ou le covoiturage sont vus comme des solutions de repli permettant d'éviter les déplacements autosolistes de longue distance, synonymes de gaspillages énergétiques, économiques et de fatigue au quotidien.

Surtout, **l'aménagement du territoire** et **les modes de vie sont orientés vers la recherche de proximité**. C'est le cas aussi bien pour les activités professionnelles qu'associatives, en passant par les activités de loisirs, une partie croissante des relations sociales, les approvisionnements alimentaires de plus en plus locaux et en circuits courts, ou encore les commerces de proximité, y compris pour les biens non alimentaires. Ces transformations sont menées en grande partie par des coopératives, des associations ou des collectifs citoyens avec le soutien des collectivités locales et des consommateurs. Cela incite le secteur privé à imaginer de nouvelles offres pour tenter de s'adapter à ces mouvements de fond. Cet aménagement se fait également en lien avec le **renouveau des villes petites et moyennes**, qui favorisent faibles distances et temps de trajet et facilitent un mode de vie en proximité. Des efforts sont réalisés pour relocaliser suffisamment l'activité économique afin que l'emploi et l'accès aux principaux biens de consommation puissent être satisfaits localement.

Pour les **déplacements longue distance**, la même logique prédomine, avec une **recherche de tourisme plus local**, plus lent, illustrée par des mouvements tel que le « slow tourisme », la majorité des gens pensant qu'avant de partir à l'autre bout du monde, elle se doit de bien connaître sa région, son pays ou les destinations proches. Une grande partie de la population rejette de plus en plus le tourisme en avion pour de courts séjours. Ces voyages lointains ne disparaissent pas mais ils apparaissent de plus en plus vus comme le voyage d'une vie ou *a minima*, comme des voyages qui méritent de passer au moins un mois sur place. De plus en plus d'employeurs acceptent d'aménager les congés afin de rendre ces pratiques accessibles au plus grand nombre.

REPORT MODAL

Les modes actifs profitent de la proximité, la voiture et l'avion en fort retrait

Le raccourcissement des distances favorise **le report modal vers les modes sobres en énergie et en ressources**. En effet, la proximité au quotidien est d'abord recherchée pour faciliter le développement des modes actifs : la marche et le vélo, ce dernier autorisant des distances plus élevées sans peser fortement sur les ressources.

Avec des investissements limités dans des infrastructures nouvelles – à la fois pour des raisons financières et pour réduire l'impact environnemental des travaux –, le report modal est soutenu autant que possible par **la modification des infrastructures existantes et de leurs usages** plutôt que par de nouvelles constructions. Une **réallocation volontariste de l'espace** dévolu à la voiture vers les infrastructures cyclables et la marche est donc engagée, au détriment des places de stationnement de surface et des voies de circulation jusqu'ici principalement utilisées par les voitures. Plus globalement, l'espace public est restructuré. Il s'agit de remettre de la végétation en ville, proposer davantage d'espaces d'attente aux piétons et d'espaces favorables aux relations sociales, que les citoyens s'approprient pour proposer diverses animations ou services. Dans les villes, une part croissante des rues passe en zones de rencontre et en aires piétonnes. Des voies de circulation sont fermées aux véhicules motorisés (hormis ceux limités à 25 km/h tels que les vélos à assistance électrique), principalement dans le centre des villes et des villages. C'est aussi le cas de certaines petites routes rurales, ou permettant d'accéder à des sites naturels ou culturels à préserver des nuisances de la motorisation (bruit, pollution, congestion, etc.). Cela permet de sécuriser la pratique du vélo au quotidien, ainsi que les modes actifs pour la promenade, les loisirs ou encore le cyclotourisme.

L'autre levier fort de sécurisation des usagers les plus vulnérables concerne **la baisse des vitesses sur la route**, qui concerne tous les types de routes. Le 30 km/h en agglomération devient rapidement la norme au niveau national pour les axes principaux et le 50 km/h l'exception, gérée au niveau local. Pour les routes les plus rapides, les vitesses limites sont abaissées à 110 km/h pour les autoroutes et 100 km/h pour les 2 x 2 voies hors autoroutes avant 2025. Progressivement, des sections de routes hors agglomération passent sous les 80 km/h, lorsque les aménagements cyclables sécurisants manquent ou si les routes sont jugées trop sinueuses ou dangereuses pour ces vitesses. Cet abaissement des limites s'accompagne de contrôles plus importants mais reste largement soutenu par la population, qui tient à ce que les enfants, de plus en plus nombreux à utiliser le vélo et la marche, soient en sécurité lors de leurs déplacements.

Par ailleurs, **l'usage des transports en commun est également soutenu** par les pouvoirs publics, qui peinent néanmoins à améliorer l'offre et la qualité de service, que ce soit pour les bus, les cars ou les transports ferroviaires et guidés (tramways). Les usagers plébiscitent néanmoins ces modes de transport écologiques au quotidien, afin d'éviter de prendre la voiture lorsque les modes actifs ne conviennent pas. Mais c'est **surtout pour les déplacements à longue distance** qu'ils se développent. Cela se fait en parallèle de l'émergence d'autres manières de voyager : redéveloppement des trains de nuit, tourisme régional autour des produits du terroir ou de sites culturels proches des habitants, ou encore randonnées pédestres et cyclotourisme, qui peut nécessiter des transports en commun jusqu'aux lieux de départ.

> De plus en plus de Français considèrent que la voiture n'est pas compatible avec l'urgence écologique.

Avec ces changements importants, **la place de la voiture est en net recul**, en raison des baisses de distances, de la place croissante des modes actifs sur les courtes distances et celle des transports en commun, en particulier sur la longue distance. En plus d'une place réduite, l'image de la voiture auprès de la population se dégrade fortement. De plus en plus de Français considèrent qu'elle n'est pas compatible avec l'urgence écologique, bien qu'elle soit de plus en plus électrique et adaptée aux besoins (covoiturage, autopartage, véhicules légers, etc.). La publicité est globalement en fort recul dans la société, mais les voitures ont été les premières concernées, en commençant par les véhicules thermiques et les plus lourds.

Dans le même temps, **l'avion connaît une très forte désaffection**. Dénoncé comme un mode inégalitaire

qui profite aux plus riches, polluant et très difficilement décarbonable, son avenir est vivement débattu. Progressivement, les politiques publiques se sont tournées, non sans difficultés et résistances, vers une **baisse assumée du trafic aérien**. Les fonds libérés par l'arrêt progressif des aides publiques au secteur et les ressources issues de sa taxation sont réorientés vers les modes de transport plus sobres. Les lignes intérieures ont été supprimées progressivement, les jets privés interdits en dehors de quelques rares exceptions et de nombreux petits aéroports ont fermé. Des quotas d'utilisation de l'avion ont été instaurés pour certains types de trajets et ont accompagné la volonté d'une part croissante de la population de limiter voire de s'interdire son usage. Les usages professionnels sont également en forte baisse. Il reste cependant utilisé pour les motifs familiaux ou de longs voyages, plus rares mais avec une durée de séjour plus élevée également.

REMPLISSAGE

Le covoiturage solidaire et l'autostop se développent dans les zones rurales

Pour les trajets à longue distance, le train et l'autocar sont complétés par un covoiturage auquel recourent largement les personnes utilisant la voiture. Le covoiturage libre, sans commission pour les plateformes, se développe massivement entre usagers. De même, pour **les déplacements du quotidien, le covoiturage solidaire se développe** dans des formes qui varient selon les territoires et les initiatives locales. De nombreux systèmes coexistent, parfois gérés par les citoyens, des associations, les collectivités ou des plateformes rémunérées par les usagers ou les collectivités. C'est souvent le bouche-à-oreille qui permet progressivement d'imposer un ou deux systèmes suffisamment utilisés pour être efficaces. C'est particulièrement le cas dans les zones rurales, pour permettre aux ménages démotorisés de pallier les manques de transports collectifs ou les trajets impropres à la marche ou au vélo. Ces systèmes reposant essentiellement sur l'entraide plus que sur l'éventuel avantage financier pour les conducteurs, l'autostop se développe également avec des temps d'attente généralement faibles sur les axes suffisamment fréquentés. Même progression pour l'autopartage, souvent entre personnes qui se connaissent, parfois de manière plus organisée.

EFFICACITÉ

La réduction du poids et de la vitesse des voitures permet des gains significatifs

Les progrès en matière d'efficacité énergétique sont essentiellement le fait d'usages plus sobres des véhicules : écoconduite, réduction des vitesses et allègement progressif du parc de véhicules. En effet, des normes sur les voitures neuves limitent la vitesse maximale, la puissance et le poids de la plupart des véhicules. Le poids est aussi taxé pour favoriser les véhicules les plus légers, aussi bien pour financer les modes actifs que les voiturettes ou quadricycles de moins de 500 kg qui se développent progressivement jusqu'à représenter plus de 40 % des ventes dès 2035. Les véhicules, dans l'ensemble plus légers, bénéficient de la diffusion de chaînes de traction électrique adaptée aux usages et ne cherchant pas à tout prix la performance. Le véhicule électrique devient en quelque sorte une commodité et des architectures standards sont utilisées (approche open source, productions de communs) ce qui permet de bénéficier d'un gain de consommation énergétique par rapport aux solutions thermiques.

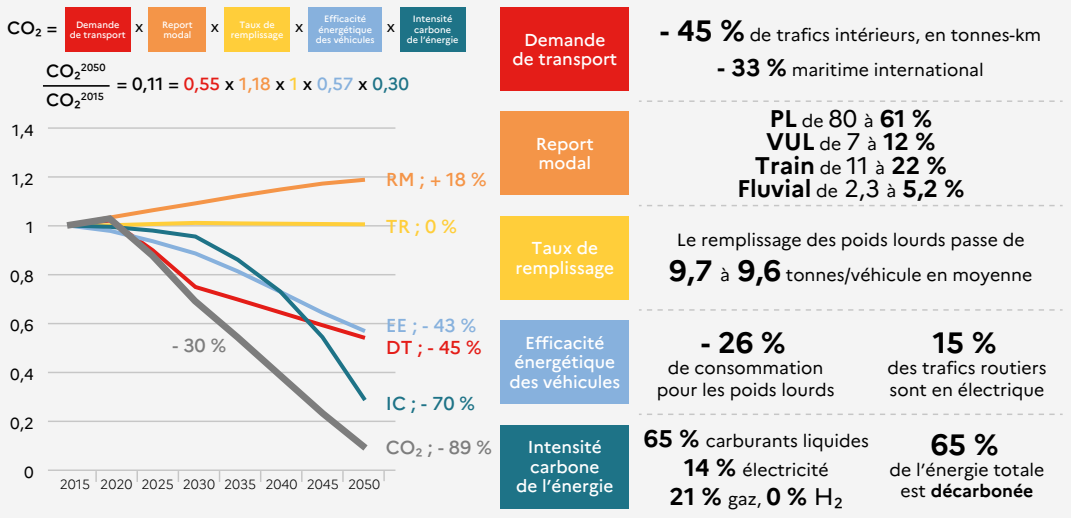
DÉCARBONATION

L'électrification et les biocarburants de première génération en priorité

La sortie du pétrole est un objectif clair de l'évolution du mix énergétique des transports. Cependant, les impacts environnementaux des alternatives au pétrole sont jugés importants : consommation de métaux, de biomasse, pollution des milieux ou besoins énergétiques qu'il s'agit avant tout de réduire. En raison de capacités d'investissement limitées et tout en cherchant à prolonger la durée de vie des véhicules, **le renouvellement du parc de voitures vers l'électrique se fait à un rythme modéré**. Il permet toutefois d'atteindre l'objectif de fin de ventes de voitures thermiques en 2040, à quelques exceptions près qui perdurent jusqu'en 2045. En 2050, le mix énergétique des mobilités repose donc largement sur l'électricité, particulièrement développée pour les voitures, secondairement pour les deux-roues motorisés (2RM) et les autobus. Une part de carburants liquides subsiste néanmoins pour de nombreux modes difficiles à décarboner. C'est le cas essentiellement du transport aérien, mais aussi d'une partie des 2RM, des autocars, des trains et, plus faiblement en proportion, des voitures. Seulement 60% de ces carburants liquides sont des biocarburants de première génération (à base de cultures alimentaires) en 2050. Le reste demeure dépendant du pétrole, ce qui signifie que l'objectif de neutralité carbone n'est atteint que grâce aux capacités de stockage des puits de carbone exclusivement naturels (forêts, prairie, etc.). Le **mix énergétique est complété par le vecteur gaz**, totalement décarboné (biogaz) et principalement utilisé pour les autocars, les autobus, puis sur certaines lignes ferroviaires non électrifiées.

TRANSPORT DE MARCHANDISES

Graphique 10 *Résumé des principales évolutions du scénario 1 marchandises entre 2015 et 2050*



DEMANDE

Une baisse forte des trafics internationaux et routiers est visée

Des objectifs de relocalisation guident l'évolution de l'économie, aussi bien pour l'agriculture et l'industrie que les services, avec notamment comme objectif de réduire les flux de marchandises, aussi bien à l'international que pour le transport intérieur. Dans ces transformations, le rôle du citoyen-consommateur est fort pour orienter cette relocalisation *via* des comportements d'achats qui visent à soutenir une économie locale et plus responsable. Les politiques publiques accompagnent ces changements, par la régulation du secteur, qui se traduit par exemple par l'interdiction de la livraison gratuite en raison des coûts cachés pour la société, les multiples aides aux relocalisations ou pour faciliter la mutualisation de la logistique de proximité. L'offre s'adapte à ces évolutions par la qualité, la quantité ou la variété des produits (moins de références mais plus qualitatives) et par la localisation des activités et des lieux de vente, qui se veulent généralement à taille réduite et proches des habitants.

Par exemple, pour l'alimentation, les achats en circuits courts, dans les marchés, les commerces de proximité ou encore les supermarchés coopératifs se développent, au détriment notamment des zones commerciales de périphérie qui subissent une certaine désertion. La réduction des flux passe par une légère baisse des volumes transportés, par une réduction du gaspillage alimentaire, des apports journaliers par personne ou des quantités de viande ou de boissons consommées. Les chaînes logistiques sont également raccourcies en réduisant la transformation des aliments et en rapprochant les consommateurs des producteurs. Enfin, les productions locales s'accompagnent d'une baisse des distances moyennes parcourues, entraînant également la baisse des trafics. Pour les autres marchandises, ce sont surtout **les quantités transportées qui portent les flux à la baisse**. En effet, la construction neuve est en très forte baisse et fait chuter les volumes de matériaux de construction à transporter, la production industrielle ainsi que la consommation de biens manufacturés sont également en baisse (*cf.* les chapitres *1.2. Société, modes de vie, récits*, *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*, *2.2.3. Production industrielle*).

REPORT MODAL

Des contraintes fortes pour favoriser le report modal sur les longues distances

Le report modal est un objectif important pour les marchandises, toutefois il est contraint par des capacités d'investissements limitées et ne permet pas d'atteindre un niveau de service optimal. **Deux cibles sont privilégiées pour limiter le recours aux véhicules routiers** : les transports massifiés sur longue distance et la livraison du dernier kilomètre par la cyclologistique.

Pour la longue distance, des mesures règlementaires et de taxation du routier permettent de privilégier très largement les modes fluviaux et plus encore ferroviaires, en particulier au-delà de 500 km. Ces

mesures ont pour double effet d'obtenir un report modal important sur cette classe de distance, mais aussi d'encourager à la réduction de ce type de trajets et à la relocalisation.

Sur les courtes et moyennes distances, le mode routier reste cependant prépondérant, tandis que le fluvial et le ferroviaire constituent plutôt l'exception. Les trajets locaux de quantités de marchandises limitées sont réalisés en véhicules utilitaires légers, plus faciles à électrifier que les poids lourds. Dès que cela est possible, **le recours aux vélos cargos est privilégié**. Cette logistique locale et des derniers kilomètres se fait beaucoup pour compte propre (plutôt que par des opérateurs de transport dédiés), directement par les artisans, les producteurs agricoles, les commerçants ou encore par des particuliers pour les systèmes gérés par les citoyens ou par des réseaux de proximité et d'entraide. La transition vers la cyclologistique dans les villes profite de la réallocation des infrastructures (voiries, trottoirs et autres espaces publics) pour les modes actifs, ainsi que du ralentissement des vitesses des trafics et d'une recherche d'un rythme de vie apaisé (*slow city*).

Sur les courtes et moyennes distances, le mode routier reste cependant prépondérant, tandis que le fluvial et le ferroviaire constituent plutôt l'exception.

Dans le même temps, en raison des relocalisations et d'un certain protectionnisme économique, couplés à des baisses de quantités d'énergies fossiles et de certaines matières premières consommées, **les trafics internationaux** et en particulier le transport maritime **subissent une baisse marquée**.

REMPLISSAGE

Les efforts de mutualisation compensent certaines inefficacités du local

Le recours croissant en proportion aux véhicules utilitaires légers à la place des poids lourds pour la logistique porte le **risque d'une démassification des transports**, c'est-à-dire d'une multiplication des parcours de véhicules peu remplis, moins efficaces par tonne transportée que les poids lourds. Pour contrer ces effets négatifs, des efforts de mutualisation sont organisés par les collectivités, les entreprises entre elles, ou par l'entraide entre connaissances, pour éviter cette fragmentation des trajets et conserver globalement des taux de remplissage similaires à ceux d'aujourd'hui pour les utilitaires légers.

EFFICACITÉ

Des progrès honorables sur l'efficacité des moteurs

Les progrès sur l'efficacité énergétique des moteurs sont limités et ne sont plus recherchés comme une piste principale de décarbonation. Le renouvellement du parc avec la diffusion de la motorisation électrique pour les véhicules non articulés (utilitaires et poids lourds rigides) permet quelques gains. Mais c'est surtout l'efficacité énergétique par tonne transportée qui est recherchée, d'où la priorité au report modal et à la mutualisation des trajets pour le mode routier. La principale source d'efficacité énergétique provient de l'électrification, marquée essentiellement pour les véhicules utilitaires légers, mais peu présente pour les autres modes de transport.

DÉCARBONATION

Une focalisation sur la biomasse, insuffisante pour se séparer du pétrole

La décarbonation de l'énergie dans le scénario s'appuie sur les solutions existantes et éprouvées. Le faible niveau d'investissement dans les solutions de décarbonation et la difficulté ou les coûts élevés des solutions de substitution au pétrole font que les carburants liquides et notamment le pétrole gardent une place importante dans le mix énergétique du transport de marchandises en 2050.

Pour **les véhicules les plus légers comme pour les vélos cargos et pour les courtes et moyennes distances**, le vecteur électrique se développe fortement. Il représente jusqu'à quasiment la moitié des kilomètres parcourus par les véhicules utilitaires légers. Le gaz naturel véhicule se développe également mais dans de moindres proportions pour ces utilitaires et il reste une part importante de carburants liquides qui ne sont pas totalement décarbonés en 2050. Il en va de même pour les poids lourds qui restent dépendants pour plus de la moitié au diesel, dont la moitié environ est fournie par les biocarburants. Parmi ces biocarburants, ceux de première génération (produits à partir de cultures énergétiques) restent majoritaires. Pour le gaz, majoritairement utilisé par les poids lourds, le biogaz fournit l'ensemble de la demande.

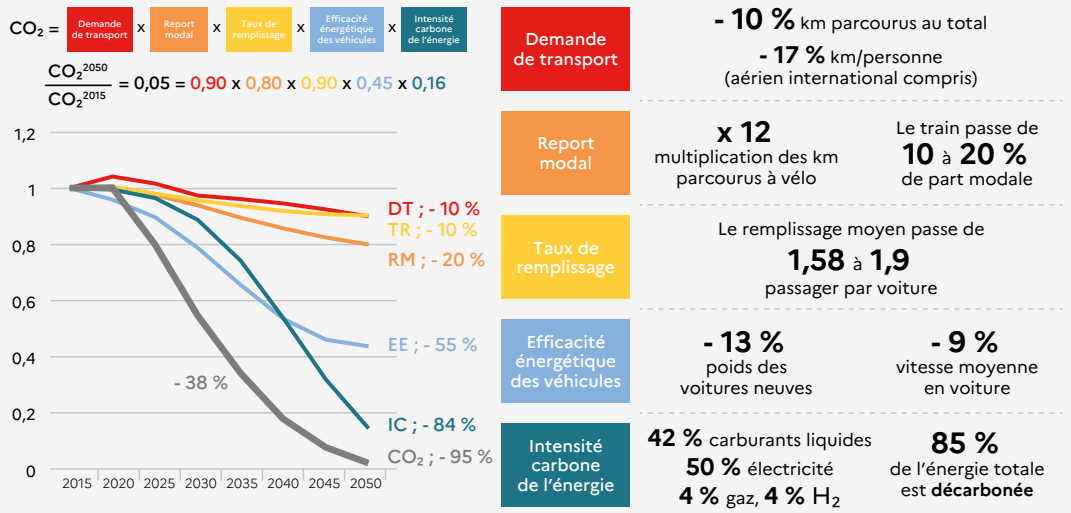
Comme pour les modes routiers, les transports fluvial et maritime restent largement dépendants également des carburants liquides, et donc en partie du pétrole. Compte tenu des durées de vie très importantes des navires, le renouvellement du parc est lent et l'on procède pour minimiser les impacts liés aux émissions de gaz à effet de serre à des mises à niveau technologiques notamment pour le secteur fluvial, avec dans ce cadre des conversions pour motorisations au gaz naturel liquéfié et dans une moindre mesure pour la propulsion électrique.

5.3. Scénario 2 : la soutenabilité au cœur de la transition écologique

Le scénario est guidé par une recherche de soutenabilité, avec pour but de réduire simultanément les différentes pressions environnementales des mobilités sur l'environnement et les externalités sociales et économiques qui lui sont associées : consommation d'espace, accidentologie, pollutions, bruit, ou encore la sédentarité et ses impacts sur la santé. **La transition s'opère de façon co-construite** avec les acteurs de la mobilité et les citoyens, au plus proche de leurs besoins et des spécificités des territoires. Les politiques publiques veillent à offrir un accompagnement fort de ces acteurs, avec une attention particulière sur la mobilité inclusive (la mobilité pour tous) et la transition des personnes les plus fragiles ou vulnérables.

MOBILITÉ DES PERSONNES

Graphique 11 Résumé des principales évolutions du scénario 2 voyageurs entre 2015 et 2050



DEMANDE

Proximité au quotidien, tourisme durable pour les vacances

La baisse de la demande de mobilité est vue comme un facteur potentiel de **réduction des multiples externalités négatives**, sans toutefois en faire une finalité en soi.

C'est prioritairement *via* **l'aménagement du territoire** et de l'espace public que doit passer le **changement de paradigme vers une vie davantage en proximité**. Ainsi les collectivités visent-elles selon les territoires une « ville du quart d'heure », un « territoire des 20 ou 30 minutes », une relocalisation des services publics et des commerces au plus près des habitants, en favorisant la mixité des usages, ou envisagent-elles un urbanisme circulaire et la protection des espaces naturels en stoppant l'étalement urbain. Le rééquilibrage territorial évoqué au niveau national bénéficie principalement aux villes petites et moyennes, les villes entre 20 000 à 100 000 habitants étant les principales bénéficiaires d'une perte d'attractivité relative de la région Île-de-France et des grandes métropoles. Le centre de ces villes est redynamisé, laissant une place importante aux modes alternatifs, que ce soit pour les modes actifs pour les plus courtes distances ou pour leur articulation avec les modes de moyenne et longue distance en faisant des gares ferroviaires et routières des lieux privilégiés de dynamisme urbain et d'intermodalité.

Les **activités économiques** s'adaptent autant que possible à cette nouvelle donne sur l'aménagement. Cela se manifeste par un effort continu de relocalisations sur les territoires et de reconversions des filières impactées par la transition écologique, par un effort des entreprises et des territoires pour réduire les distances entre le domicile et le travail, par une mise en place accompagnée du télétravail dans l'organisation des entreprises, par le développement du travail dans des tiers-lieux partagés et à proximité des habitations, ou pour s'adapter aux nouvelles aspirations sur les lieux d'achat ou d'activités de loisirs.

Enfin, **le tourisme durable se développe avec très peu de mobilité automobile ou aérienne** au profit d'un usage massif des transports en commun, du vélo et de la marche. De fait, cela s'accompagne par des offres à une échelle plus régionale, ce qui réduit les distances moyennes de départs en vacances.

REPORT MODAL

Une politique orientée vers une sollicitation maximale du report modal

Le levier de report modal est sollicité de manière très forte. De nombreuses politiques publiques le favorisent, avec un soutien massif des citoyens et des usagers. L'approche mêle un aménagement du territoire des courtes distances qui favorise la pratique des modes actifs, un dynamisme des lieux d'intermodalité, de nombreux services proposés aux usagers et une fiscalité très incitative. Des projets de création et de renouvellement d'infrastructures donnent la **priorité systématique aux modes les plus sobres** et accompagnent progressivement l'évolution des usages. Les collectivités territoriales sont dotées de moyens conséquents et décident en coopération avec les acteurs économiques concernés et les citoyens de l'allocation de ces ressources à des actions de plus ou moins long terme : renforcement de l'offre de transports en commun et des services de mobilité, subventions à l'achat de nouveaux véhicules sobres ou investissements sur les infrastructures ou les véhicules. La temporalité de la transformation est ainsi progressive, mais dépend fortement de l'action concernée. Pour accélérer certaines évolutions, l'urbanisme temporaire ou la réduction des vitesses sont utilisés pour favoriser la sécurisation des modes actifs, tout en planifiant un réseau d'infrastructures continues et efficaces à plus long terme.

Le premier mode à bénéficier d'une attention renouvelée est la marche, considérée comme un mode de transport à part entière. Les piétons sont vus comme des usagers vulnérables à protéger au maximum et l'espace public comme des lieux à adapter pour eux. Les collectivités s'orientent donc vers des villes et villages marchables et l'aménagement est pensé pour les piétons. Les cheminements sont agréables et sécurisés, des efforts de végétalisation sont entrepris, de nouveaux parcs voient le jour, des toilettes publiques, des fontaines à eau, des bancs, des boîtes à livres ou des échanges de services investissent l'espace public pour faciliter la marche et l'occupation des lieux par la population.

Ce scénario est également celui de plus fort développement du vélo. **Un système vélo efficace est mis en place partout sur le territoire**, aussi bien dans le centre des grandes villes que progressivement dans les zones peu denses. C'est aussi un scénario de diversification pour le vélo. Diversification dans les politiques publiques, qui cumulent de nombreux leviers pour soutenir son développement : aides fiscales à l'achat et à l'usage (type forfait mobilité durable), systèmes de locations de courtes et longues durées, infrastructures sécurisées, stationnements abondants, campagnes de communication sur les vertus individuelles et collectives du vélo ou encore soutiens aux acteurs de la filière. **Diversification aussi dans les pratiques**, depuis les usages du quotidien au loisir, en passant par le cyclotourisme et l'intermodalité avec le train et les cars pour les déplacements longue distance. Diversification enfin dans les véhicules utilisés. Au-delà du vélo classique se développent des véhicules adaptés aux usages, dont les vélos à assistance électrique (VAE) qui sont en fort développement, les vélos pliants en particulier pour l'intermodalité, les vélos cargos pour le transport d'enfants et de charges, les vélomobiles (vélos couchés carénés, plus rapides) et les speed-pedelecs (VAE jusqu'à 45 km/h) pour les moyennes distances ainsi que d'autres véhicules adaptés à des usages plus spécifiques. Ces effets se renforcent pour créer une large culture vélo qui se diffuse progressivement dans la population, sous des formes variées.

Les modes actifs sont complétés par un **volontarisme fort sur le développement du ferroviaire**, utilisé comme un outil majeur d'aménagement du territoire et de substitution progressive aux trajets métropolitains en avion et à une partie des trafics automobiles. Les plus forts développements sur la longue distance s'appuient sur le dynamisme des trains Intercités, en particulier par une relance très vigoureuse des trains de nuit sur les liaisons radiales (depuis/vers Paris), transversales et les trajets internationaux en Europe. Les forts investissements sur les petites lignes permettent également d'assurer un maillage efficace de tout le territoire, pour réduire autant que possible le recours à la voiture. L'intermodalité avec la marche et le vélo, le covoiturage et l'autopartage depuis les gares sont vus comme stratégiques pour faciliter les trajets porte-à-porte. Le développement des bus et cars est aussi pensé en complémentarité avec le ferroviaire, pour les territoires et liaisons non desservis par le train. En lien avec le dynamisme des villes moyennes, les systèmes de tramways, de trolleybus ou de transports par câbles rencontrent aussi un certain succès.

L'intermodalité avec la marche et le vélo, le covoiturage et l'autopartage depuis les gares sont vus comme stratégiques pour faciliter les trajets porte-à-porte.

En rendant la transition progressive, en proposant des alternatives et en veillant à la transition des emplois, **la place de la voiture et de l'avion est progressivement remise en cause**. Parmi les évolutions emblématiques du scénario : le stationnement payant est généralisé bien plus largement dans l'es-

pace public urbain pour les voitures et les deux-roues motorisés et leur nombre est aussi en forte baisse. Les limitations de vitesse baissent progressivement ; une taxation progressive des voyages en avion est introduite, croissante avec l'usage dans un esprit de justice sociale.

REMPLISSAGE

Les collectivités locales organisent le covoiturage sur leur territoire

Des systèmes de covoiturage financés par les collectivités se développent de manière un peu dispersée sur le territoire, soutenus tantôt par les régions, les intercommunalités ou les métropoles. Cela n'empêche pas une efficacité importante de ces services pour les déplacements du quotidien, en particulier dans les zones fortement dépendantes de la voiture, tandis que la pratique est largement répandue pour les déplacements sur longue distance. Surtout, le système de covoiturage est pensé en complémentarité avec les modes actifs et les transports en commun ferroviaires et routiers qui sont préférés dès que cela est possible.

De même, alors que les déplacements du quotidien se détournent de plus en plus de la voiture et amènent un grand nombre de ménages à se démotoriser, **divers services d'autopartage se développent fortement pour les usages exceptionnels**, en particulier pour les trajets à longue distance ou en groupe.

EFFICACITÉ

Les véhicules sont adaptés autant que possible aux usages et besoins réels

La voiture telle qu'on la connaît aujourd'hui évolue vers une grande diversité de modèles, en termes de nombre de places, de poids, d'autonomie pour les véhicules électriques ou encore de vitesse maximale. Cette diversification vise à répondre au mieux aux usages réels de la mobilité du quotidien des ménages, en évitant que les ménages d'une ou deux personnes ne possèdent de véhicule de 5 places, par exemple. De manière générale, cette diversification rejoint celle sur les véhicules proches du vélo, avec une gamme importante de modes ou de **véhicules intermédiaires entre le vélo classique et la voiture**. C'est aussi dans ce contexte d'usages alternatifs à la voiture et de petits véhicules au quotidien que se développe l'autopartage pour la longue distance, dès que les services de transports partagés (du train au covoiturage) ne peuvent satisfaire à la demande des ménages démotorisés.

La diversification des véhicules est le principal facteur d'efficacité énergétique des nouveaux véhicules, complétée par des **baisses de vitesse** sur les routes mises en place de manière relativement progressive et variée selon les territoires, en fonction notamment des conventions ou concertations locales. Cette réduction des vitesses se fait en priorité dans les villes, avant de s'étendre progressivement dans les villages et les routes interurbaines.

Enfin, **l'écoconduite** (favorisée par la conception des véhicules, dont la limitation des accélérations), l'aérodynamisme des véhicules ainsi que les progrès sur les motorisations complètent les gains d'efficacité obtenus par la diminution du poids et de la vitesse des véhicules. La diversité des sources énergétiques mobilisées s'accompagne de la recherche de la meilleure adéquation possible entre les technologies et les usages. C'est notamment le cas pour l'électrification des chaînes de traction, plus efficaces, avec une hybridation rechargeable en début de scénario en appui aux véhicules thermiques et des dimensionnements de batteries pour les véhicules électriques ajustés au plus près des besoins réels.

DÉCARBONATION

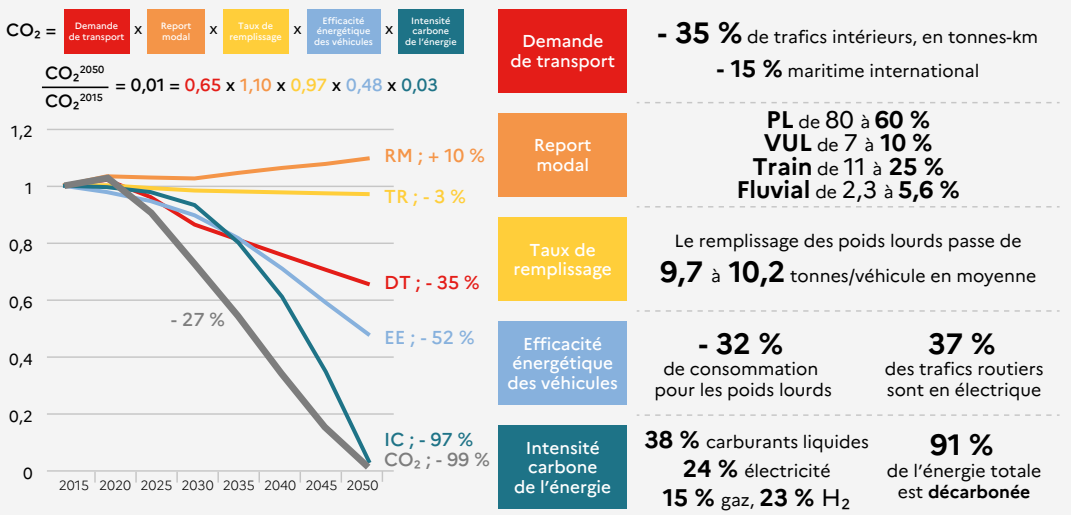
La transition énergétique pensée à partir des ressources locales

La transition énergétique des transports et plus globalement de l'économie est pensée autour des ressources locales, à savoir notamment les potentiels de production de biomasse, d'électricité renouvelable ainsi que les possibilités de transformation de ces ressources en hydrogène, en carburants liquides et gazeux. Tous les vecteurs décarbonés sont utilisés selon leur disponibilité et leur adéquation aux situations locales, en recherchant l'optimum technico-économique en lien avec les usages.

Pour la mobilité des personnes, la transition se fait essentiellement vers l'électrique qui s'impose particulièrement sur les voitures, fortement sur les deux-roues motorisés et dans une moindre mesure sur les bus. Une partie de l'électrification de ces flottes, en particulier pour les bus, se fait par le rétrofit (adaptation) de véhicules thermiques. L'industrie automobile et de construction de véhicules se tourne fortement vers des modèles d'économie circulaire de plus en plus poussés et une relocalisation d'une partie croissante de la chaîne de valeur en France et parfois à une échelle régionale, par exemple pour les véhicules intermédiaires. En plus de l'électrification et en lien avec le déploiement des énergies renouvelables et les possibilités de stockage énergétique, des **écosystèmes hydrogène** sont développés localement et trouvent leurs usages essentiellement pour les autocars, les autobus et les trains pour ce qui concerne la mobilité des voyageurs, son usage étant plus important pour le transport de marchandises. Le mix de ces modes est généralement complété par le recours au biogaz et par des biocarburants qui permettent de faire fonctionner le parc existant de véhicules thermiques avant leur renouvellement.

TRANSPORT DE MARCHANDISES

Graphique 12 Résumé des principales évolutions du scénario 2 marchandises entre 2015 et 2050



DEMANDE

Une réduction des volumes de marchandises et des distances parcourues

Le principal levier qui guide la politique des transports est celui du report modal, en interaction forte avec l'évolution de la demande totale, l'organisation logistique, l'aménagement du territoire et des pôles intermodaux ou encore les délais de livraison. L'évolution de l'économie vers des écosystèmes territoriaux, une plus grande proximité dans les chaînes d'approvisionnement et les achats des consommateurs, permet une certaine **relocalisation d'une partie de la logistique autour d'écosystèmes régionaux**, permettant autant que possible un maillage et une desserte fine du territoire avec les modes alternatifs au transport routier de marchandises. Ce sont principalement les collectivités territoriales qui guident ces évolutions, en concertation avec les acteurs économiques, les citoyens et les acteurs de la logistique. Le e-commerce continue son développement de manière modérée et avec un encadrement strict pour faciliter la mutualisation des flux, en particulier par l'interdiction des livraisons gratuites et en développant de manière privilégiée la livraison en points relais.

Les flux de marchandises sont globalement en baisse, pour des raisons similaires à S1, avec une réduction forte des volumes pour certains types de flux (baisse des constructions neuves notamment ou de la production industrielle), la baisse des distances moyennes, ainsi que la réduction du nombre d'intermédiaires des chaînes logistiques notamment pour les flux liés à l'alimentation. Le rythme de transformation est cependant plus lent et concerté que dans S1, par des évolutions fiscales progressives et l'accompagnement des politiques publiques, plutôt que par la réglementation et les contraintes.

REPORT MODAL

Les actions sur la logistique orientées vers un fort report modal

Sur la moyenne et la longue distance, les transports ferroviaires et fluviaux sont préférés au routier dès que cela est possible. Sur la courte distance, la **cyclo-logistique** est développée à son maximum dans sa zone de pertinence, avec une diversité de véhicules qui permettent de satisfaire une variété de besoins : livraison, déménagement local, entrepreneurs à vélo, etc. La logistique des derniers kilomètres est complétée par les véhicules utilitaires légers électriques, quand les distances, les masses unitaires et les remplissages sont trop élevés pour la cyclologistique et trop faibles pour un transport plus massifié.

Les différents leviers possibles pour accélérer le report modal sont sollicités par les acteurs publics, les acteurs de la logistique ainsi que les citoyens par leurs comportements de consommation :

- cela passe notamment par un investissement soutenu de l'État et des collectivités dans les infrastructures : investissements de modernisation du réseau principal, des capillaires, des installations terminales embranchées, des plateformes multimodales pour

le fret ferroviaire, aménagements pour gagner en capacité sur le réseau et sur les nœuds ferroviaires ; travaux du canal Seine Nord Europe, entretien des réseaux de grands à petits gabarits, aménagements pour faciliter l'emport de conteneurs ou la livraison dans le centre des villes situées sur un fleuve navigable ou un canal ; aménagements cyclables larges et sécurisés, règles de circulation modifiées, stationnements adaptés et pôles d'échange multimodaux pour faciliter la cyclologistique ;

- un second levier structurant concerne l'évolution de la fiscalité et des incitations financières, qui visent à une meilleure internalisation des coûts externes des transports (CO_2, pollution, congestion, accidentologie, usage des infrastructures, etc.) dans les coûts supportés par les chargeurs. Cette évolution se concrétise en particulier par une hausse progressive de la tarification des infrastructures interurbaines et urbaines pour les poids lourds et les véhicules utilitaires légers, afin de financer les infrastructures des modes alternatifs ainsi que certains services ou subventions d'exploitation ;

- avec un effet à plus long terme, l'aménagement des villes, des zones d'activités ou encore des centres logistiques s'adapte à ce nouveau contexte et anticipe l'évolution vers une logistique de plus en plus tournée vers les modes alternatifs au transport routier ;

- enfin, l'organisation logistique et les comportements évoluent également, encouragés par la tarification des infrastructures et des livraisons et par la prise de conscience que les contraintes temporelles et la gestion des stocks ont une influence majeure sur les possibilités de massification.

REMPLISSAGE

L'optimisation de l'offre est recherchée, pour s'adapter aux besoins réels

Pour les différents besoins logistiques, les transporteurs cherchent à utiliser les véhicules les plus adaptés aux besoins, avec une mutualisation plus poussée qu'aujourd'hui entre acteurs de la logistique, et en cherchant autant que possible à favoriser les modes de transport les plus efficaces sur la consommation d'énergie et l'empreinte carbone. C'est cette recherche de la juste adéquation entre l'offre et la demande qui permet d'optimiser les remplissages et éviter autant que possible les trajets à vide ou peu remplis.

EFFICACITÉ

L'organisation de la logistique pensée pour gagner en efficacité

En lien avec le report modal et l'optimisation des remplissages des véhicules, l'efficacité globale du système logistique s'améliore fortement, sans pour autant que l'efficacité énergétique des moteurs en tant que telle ne fasse d'importants progrès. Le renouvellement du parc se fait néanmoins vers des véhicules plus efficaces, principalement par les leviers de l'hybridation et de l'électrification des véhicules, mais également en sollicitant d'autres leviers d'efficacité, tels que l'aérodynamisme des véhicules, la réduction des frottements des pneus ou l'écoconduite.

DÉCARBONATION

Une combinaison des énergies en adéquation avec les ressources locales

Pour la décarbonation du transport de marchandises, **l'ensemble des vecteurs décarbonés disponibles est utilisé** autant que possible afin d'être en adéquation avec les situations locales. Ainsi, les consommations d'énergie se partagent selon les modes entre les vecteurs électrique, hydrogène, gazeux et liquides, dont la production est de plus en plus décarbonée à l'horizon 2050. Le déploiement de l'électricité se fait avec une recherche d'optimum technico-économique, en regard du coût, de la capacité de la batterie installée et des usages. C'est d'abord sur la logistique des derniers kilomètres et notamment pour la cyclologistique et les véhicules utilitaires que se fait l'électrification, bien qu'elle concerne aussi progressivement les camions. Pour les transports plus lourds et à longue distance, les autres vecteurs sont développés pour pallier les capacités insuffisantes des batteries pour ces usages. Des écosystèmes hydrogène sont développés localement, en lien avec le développement des énergies renouvelables électriques et en mutualisant les usages entre plusieurs secteurs ou acteurs économiques, notamment l'industrie, le transport routier de marchandises et les trains (sur les lignes non électrifiables). C'est dans ce scénario que la demande en hydrogène s'avère la plus élevée pour les transports, avec une consommation portée à près des trois quarts par les poids lourds et les VUL. Le gaz complète le mix énergétique avec la perspective d'un passage au biogaz, en particulier pour les flottes situées dans des territoires où la production est importante. Enfin, les carburants liquides restants sont de plus en plus décarbonés, par l'essor de nouvelles filières de biocarburants en complément de la première génération à base de cultures alimentaires.

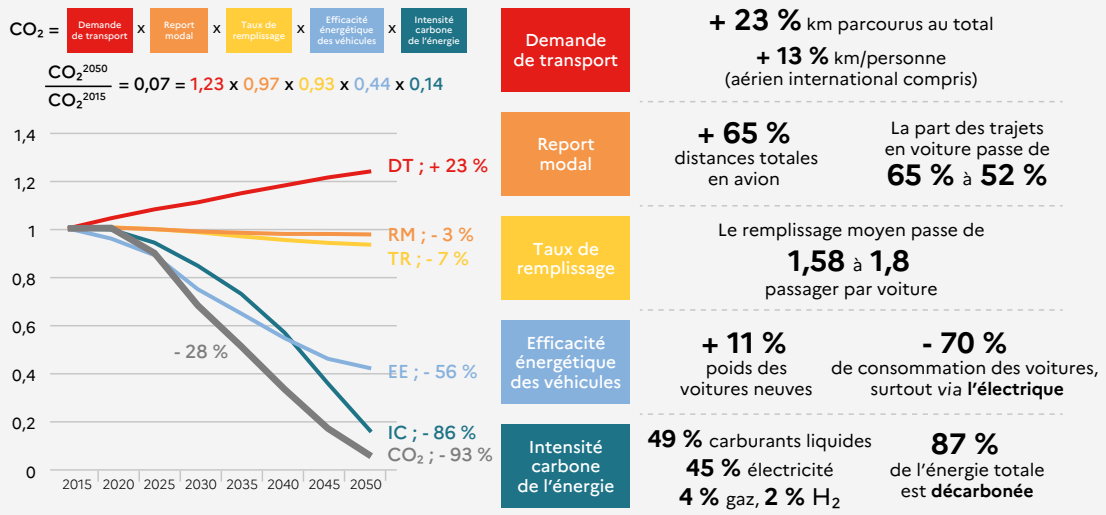
5.4. Scénario 3 : la recherche d'efficacité prime

Ce scénario est caractérisé par une recherche de la croissance et de technologies qui doivent permettre de décarboner l'offre énergétique et les principaux secteurs économiques.

C'est principalement l'État qui définit la politique énergétique ainsi que l'orientation des investissements, soutenant en priorité les entreprises françaises développant des technologies vertueuses, afin d'en faire des leaders européens voire mondiaux. Dans les transports, les principales évolutions visées concernent l'efficacité énergétique et surtout la décarbonation de l'énergie, tandis que la demande est peu contrainte, avec une ambition sur ces leviers qui est proche de celle des dernières années et du scénario tendanciel.

MOBILITÉ DES PERSONNES

Graphique 13 Résumé des principales évolutions du scénario 3 voyageurs entre 2015 et 2050



DEMANDE

L'évolution de la demande accompagnée par l'État

La modération de la demande ne fait pas vraiment partie des objectifs de l'État. L'objectif est surtout d'accompagner la demande de transport des usagers, en essayant sur certains segments de l'orienter différemment, par exemple par la création de nouvelles infrastructures ou l'adaptation de l'existant pour favoriser le développement du vélo, du covoiturage quotidien ou le transport ferroviaire.

L'État cherche donc à **accompagner les évolutions telles que le télétravail**, notamment pour limiter les conséquences des hausses de trafics, telles que la congestion sur les routes et dans les transports en commun aux heures de pointe. Ce développement a cependant un effet limité sur les trafics globaux, d'autant qu'il encourage certains choix de relocations favorisant l'étalement urbain, que l'État peine à réguler concrètement. Les comportements s'adaptent également en réponse au télétravail, favorisant tantôt les livraisons de repas ou de colis à domicile, des modes de vie plus en proximité dans le centre des villes ou des week-ends ou séjours prolongés loin du domicile pour d'autres.

L'aménagement du territoire poursuit les tendances des dernières décennies, sans grandes réorientations, avec un dynamisme économique, une attractivité touristique ou culturelle des agglomérations de plus de 200 000 habitants en particulier. Selon les endroits, la métropolisation se fait par la densification, le remplissage des espaces vides ou l'urbanisation le long des axes de transport, tandis qu'une autre partie des constructions nouvelles se fait en périphérie des métropoles.

Les déplacements à plus longue distance augmentent légèrement en fréquence, avec une durée moyenne de séjour en légère baisse et des distances moyennes en hausse, avec notamment une croissance plus forte du transport aérien et du TGV parmi les modes de longue distance.

REPORT MODAL

Un report modal surtout à l'intérieur et entre les plus grandes villes

Le report modal est porté essentiellement par la dynamique de métropolisation qui concentre les opportunités de report modal depuis la voiture.

Dans le centre des grandes villes en priorité, l'usage du vélo augmente, poussé par les collectivités locales. La pratique se développe aussi en banlieue, avec une multiplication quasiment par cinq des kilomètres parcourus en vélo d'ici 2050, portée par le fort développement du vélo à assistance électrique. Cependant, le vélo peine à s'imposer dans les périphéries éloignées des centres ou en zones rurales et reste un véhicule privilégié pour les villes ou les distances relativement courtes.

L'usage de la marche reste quant à lui proche de ses usages actuels, en intermodalité avec les transports en commun et pour les plus petites distances dans le centre des villes, notamment les métropoles.

Les transports en commun sont également dynamiques dans les plus grandes villes, avec un soutien de l'État au développement des services express métropolitains (ou RER métropolitains) des lignes de métro, de tramway ou des bus à haut niveau de service. Aussi l'État favorise l'impulsion de services de mobilités à partir d'outils numériques (MaaS), de plateformes unifiées, d'interfaces d'échanges API standardisées entre applications (API pour Application Programming Interface) et par l'encadrement règlementaire. Enfin, entre les grandes villes, le trafic des TGV reste dynamique, favorisé par la création de nouvelles lignes qui renforce encore un réseau en étoile centré autour de Paris et qui permet désormais d'atteindre les extrémités sud-ouest (ligne jusqu'à Toulouse, puis Bordeaux-Espagne par Bayonne) et sud-est (ligne nouvelle Marseille-Nice) du pays à grande vitesse, tout en renforçant les liaisons avec les pays européens voisins par le TGV ou les trains de nuit.

> La place de la voiture baisse dans le centre des grandes villes et des villes moyennes.

La place de la voiture baisse dans le centre des grandes villes et des villes moyennes, mais garde généralement une place prépondérante ailleurs, avec une dépendance qui reste majeure dans les territoires périphériques de ces villes et dans les territoires ruraux. La vision est plutôt de décarboner le fonctionnement de la voiture que de limiter son usage.

L'État cherche néanmoins à maintenir voire à développer des offres de transport publics au-delà des métropoles. Il soutient les navettes autonomes partagées, aussi bien sur route que sur rail, pour proposer une solution de mobilité légère pour les plus petites lignes ferroviaires. Cela permet d'éviter des fermetures de ligne et modère le transfert vers les autocars. L'ouverture à la concurrence se poursuit sur les transports en commun routiers et ferroviaires avec des offres plus abondantes et efficaces sur les lignes de plus forts flux mais de moindre qualité, voire inexistantes, pour les lignes les moins rentables.

Les perspectives de croissance du transport aérien ne sont que partiellement revues à la baisse pour les acteurs publics et économiques. En parallèle du développement du ferroviaire sur la longue distance, le nombre de lignes est en baisse par un effet naturel de report modal. Ce report est également accompagné parfois par l'État et les collectivités locales qui y voient un moyen de réduire les émissions. Il peut également diminuer par la rationalisation des finances publiques avec des subventions réduites pour les lignes et les aéroports les plus déficitaires. Mais dans le même temps, ces créneaux libérés sont pris pour des trajets à plus longue distance, notamment vers l'international. Aussi une partie des projets d'extensions d'aéroports est menée à terme, soutenant la croissance de la demande et du trafic aérien.

REMPLISSAGE

L'agrégation des plateformes de covoiturage pour créer l'effet d'échelle

Concernant les transports en commun, la libéralisation croissante du marché et la rationalisation des montants investis et subventionnés amènent à une concentration de l'offre sur les flux les plus importants, portant à la hausse le remplissage moyen des transports en commun.

La tendance de fond est moins favorable pour le développement du covoiturage, avec une **place encore très forte de la voiture individuelle**, ainsi que des coûts d'usage moins importants en raison de l'électrification du parc de véhicules. Néanmoins, des efforts structurants de l'État sont fournis pour favoriser l'usage du covoiturage par trois types de politiques. Tout d'abord par des incitations financières, principalement concentrées sur les déplacements domicile-travail. Ensuite par l'adaptation de l'infrastructure, en développement des aires de covoiturage sur des axes stratégiques ou encore à proximité des gares, ainsi qu'avec le développement de voies réservées, essentiellement sur les autoroutes. Enfin, pour éviter l'éparpillement de l'information au vu des nombreuses plateformes en développement sur le covoiturage du quotidien, l'État met en place une plateforme permettant d'agréger les offres et les demandes de trajets au niveau national, facilitant ainsi la mutualisation sur une plateforme unique.

Un système équivalent existe également pour les offres d'autopartage, bien que les usages restent relativement limités pour la majorité des formes d'autopartage. Le système le plus développé vient des offres proposées par les constructeurs automobiles, en combinant la location à longue durée d'un véhicule électrique du quotidien à une location de véhicule hybride pour les trajets à longue distance. Sur une même année, ces derniers peuvent être loués à des entreprises pendant les périodes scolaires et à des particuliers en périodes de vacances, pour faire face à la demande croissante sur ces périodes.

EFFICACITÉ

L'électrification est ciblée pour gagner en efficacité

Les gains de consommations d'énergie des véhicules dans le scénario sont principalement obtenus par des leviers technologiques plus que par la sobriété dans leur usage.

Le principal impact vient de l'électrification du parc, dont les consommations en énergie finale sont plus faibles que pour les moteurs thermiques. De fait, ces derniers ont encore des gains sur le début de la période, mais qui sont partiellement compensés par une légère tendance à l'alourdissement des voitures que l'allègement des matériaux ne parvient pas à compenser.

Sur la route, seules des **baisses de vitesse à 30 km/h** en ville sont réalisées selon les collectivités, mais ailleurs les limites actuelles sont conservées et les comportements de conduite évoluent peu sur la période.

DÉCARBONATION

Une forte accélération de la décarbonation des flottes et de l'énergie

La décarbonation de l'énergie est fortement poussée par l'État qui planifie une sortie accélérée des énergies fossiles quand les technologies sont disponibles.

Ainsi, pour le transport de voyageurs, la décarbonation s'appuie prioritairement sur l'électrification dont le déploiement est déjà en cours et la production largement décarbonée. Les politiques mises en place combinent des incitations financières à l'achat, un déploiement accéléré des infrastructures de recharge et un soutien aux industriels du secteur de l'automobile complété par un effort pour relocaliser la production de batteries sur le territoire.

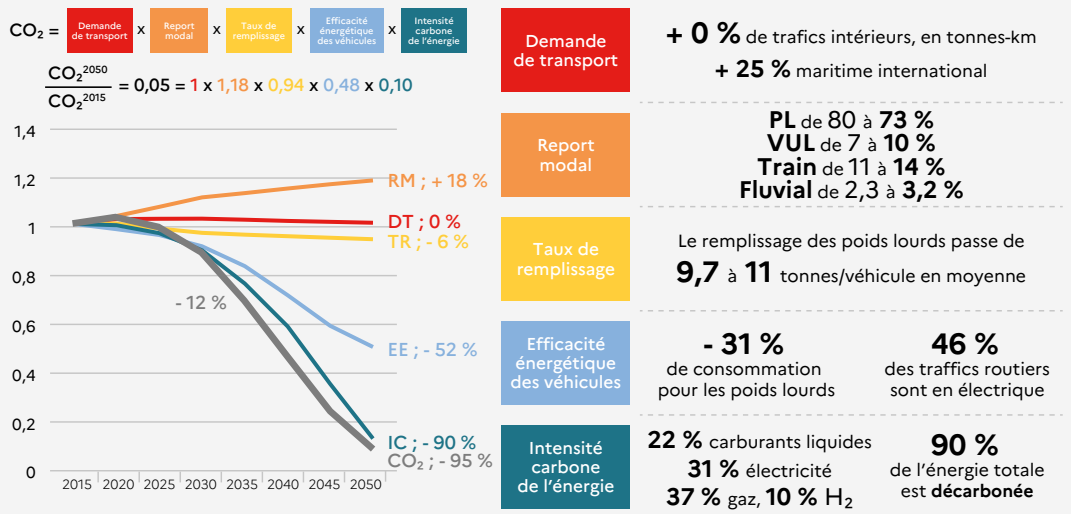
Le mix énergétique est principalement complété par les carburants liquides avec l'utilisation en plus des biocarburants conventionnels (première génération) de biocarburants avancés (deuxième génération, algues, etc.) ainsi que des e-carburants ou e-fuels (carburants synthétiques produits par combinaison de CO_2 et d'hydrogène obtenu par électrolyse d'eau) en particulier pour le transport aérien (*cf.* chapitre *2.3.4. Carburants liquides*).

Enfin, le mix énergétique pour la mobilité des voyageurs est complété par le biogaz dans des proportions plus élevées pour les autobus et autocars que pour les modes légers.

En complément, de l'hydrogène décarboné est produit et délivré à proximité des lieux de consommation, ou transporté par pipe sur de plus longues distances.

TRANSPORT DE MARCHANDISES

Graphique 14 Résumé des principales évolutions du scénario 3 marchandises entre 2015 et 2050



DEMANDE

Un objectif de croissance qui se stabilise néanmoins

L'évolution de la demande du transport de marchandises est variée selon les secteurs, pour des flux globaux relativement stables d'ici 2050, mais un peu plus basse que dans le scénario tendanciel malgré de nombreuses similitudes. La consommation reste au cœur de la société et entraîne une hausse des quantités transportées de biens manufacturés, malgré une saturation et même une baisse pour certains types de biens. Les besoins de matériaux de construction sont en baisse dans la décennie 2040-2050 par rapport aux décennies précédentes du fait du ralentissement démographique et de la place croissante des logements collectifs neufs, moins consommateurs de matériaux. De même, les quantités sont plus faibles que dans le scénario tendanciel et en légère baisse pour les produits agricoles et alimentaires, ainsi que pour les matières et biens industriels. Pour la plupart des marchandises, l'évolution de la longueur des chaînes logistiques et des distances parcourues est moins contrastée que les quantités transportées, avec parfois des légères hausses sur certains types de marchandises.

Les transformations les plus importantes dans la logistique sont dues à celles introduites par la **sollicitation croissante du numérique** pour l'optimisation des flux, la robotisation des centres logistiques et la diversification des usages des plateformes numériques pour les opérations logistiques.

Le fort développement du e-commerce transforme substantiellement la logistique du commerce B2C (business to consumer), c'est-à-dire la livraison finale des clients qui se fait de plus en plus à domicile, en points relais ou en drive. Cela a des implications sur l'utilisation des commerces, le développement des entrepôts logistiques, la question de la livraison des derniers kilomètres ou encore sur la fragmentation de certains flux avec un recours croissant aux véhicules utilitaires légers.

REPORT MODAL

Des investissements sur les grands axes ferrés et fluviaux, avec un report limité

L'État définit dans sa stratégie des transports des objectifs de report modal importants vers le fret ferroviaire ainsi que, dans une moindre mesure, vers le fluvial et la cyclologistique, essentiellement par une politique de l'offre. Cela se matérialise par des investissements dans l'entretien et la modernisation des réseaux pour soutenir des grands projets permettant de gagner en capacité et par le soutien au développement du transport combiné pour la longue distance ainsi qu'à la cyclologistique en ville.

La tarification carbone pénalise plus fortement le transport routier en favorisant par rebond les modes alternatifs. Pour autant la vision est avant tout de décarboner le transport routier et non de réduire à tout prix l'activité économique du secteur et les trafics. Le développement du e-commerce se traduit également par une hausse des trafics en véhicules utilitaires légers sur la livraison des derniers kilomètres. **Le transport intérieur de marchandises reste donc très largement dépendant du routier** et le report modal est relativement limité.

L'évolution des flux du transport maritime dans les ports français est relativement stable car la forte baisse des flux d'énergies fossiles est compensée par la hausse des trafics des autres marchandises, en particulier du transport par conteneurs. L'État investit donc dans les ports français pour dynamiser leur trafic et faire en sorte qu'une part croissante des flux maritimes internationaux transite par les ports situés en France.

REMPLISSAGE

Des gains obtenus par la massification des transports

Le remplissage des véhicules est globalement à la hausse pour les différents modes, en essayant au maximum de concentrer les flux sur les axes principaux, afin de gagner en capacité de transport, aussi bien pour le routier, le ferroviaire que le fluvial. Pour les poids lourds en particulier, les véhicules les plus capacitaires sont favorisés sur la longue distance. Les outils numériques sont utilisés de manière croissante pour regrouper des flux sur les mêmes corridors et ainsi optimiser le taux de remplissage des véhicules. Ces évolutions sont portées par des considérations avant tout économiques. En permettant d'améliorer la compétitivité du transport routier, elles peuvent avoir tendance à le favoriser au détriment d'autres modes.

EFFICACITÉ

Des gains obtenus sur les moteurs thermiques et *via* l'électrification

Le scénario pousse une transition accélérée du parc de véhicules vers des technologies bas carbone. Les investissements et les travaux de recherche et développement sont principalement tournés vers l'électrique et l'hydrogène. Les moteurs thermiques font toujours l'objet d'une attention particulière, d'autant que le biogaz et les biocarburants sont vus comme des vecteurs complémentaires et utiles à la décarbonation. Des progrès techniques sont donc obtenus sur les moteurs thermiques, mais ils ont tendance à s'amoindrir. C'est surtout l'hybridation de ces moteurs qui permet de réduire leurs consommations. C'est le cas dans un premier temps pour les véhicules ayant un usage mixte urbain et interurbain, qui ne passeraient pas directement à l'électrique.

DÉCARBONATION

L'État pousse à une conversion rapide vers un mix énergétique diversifié

L'État pousse fortement la décarbonation du transport de marchandises, en favorisant les changements de motorisation et la décarbonation des mix énergétiques. Il investit de manière ciblée dans les technologies clés qui présentent un potentiel important de décarbonation, dont les coûts sont raisonnables et lorsqu'il existe des opportunités d'exportation et de leadership mondial pour les entreprises françaises ou les consortiums européens.

Une politique intégrée est prévue pour fournir incitations et contraintes envers les acteurs de la logistique et de l'énergie pour faciliter cette décarbonation. Il s'agit des aides à l'achat et à la conversion des flottes de véhicules, du soutien au déploiement des infrastructures de recharge et d'avitaillement des énergies, de la taxation croissante du carbone, d'obligations d'incorporation d'une part croissante d'énergie décarbonée dans les carburants, ainsi que de mécanismes de soutien pour la production d'énergie décarbonée.

L'électrique se déploie principalement sur les véhicules utilitaires légers, dont une grande majorité des parcours est réalisée avec ce vecteur. L'État développe un **réseau d'autoroutes électriques** sur les principaux axes autoroutiers pour décarboner les poids lourds sur la longue distance. Ce système est utilisé à la fois par des véhicules hybrides et des véhicules 100% électriques qui fonctionnent sur batterie pour les derniers kilomètres. Ces infrastructures sont complétées par un déploiement large et cohérent d'infrastructures de recharge sur le territoire.

Le second vecteur le plus utilisé dans le transport routier de marchandises est le GNV, progressivement orienté vers le biogaz. Il est principalement utilisé pour les poids lourds, plus faiblement pour les utilitaires légers et pour décarboner une part substantielle des consommations d'énergie du fluvial.

L'hydrogène, un vecteur fortement poussé par l'État en accompagnement des stratégies européennes, est aussi utilisé pour représenter environ 10% des kilomètres parcourus, principalement réalisés par les PL, VUL et autobus/autocar.

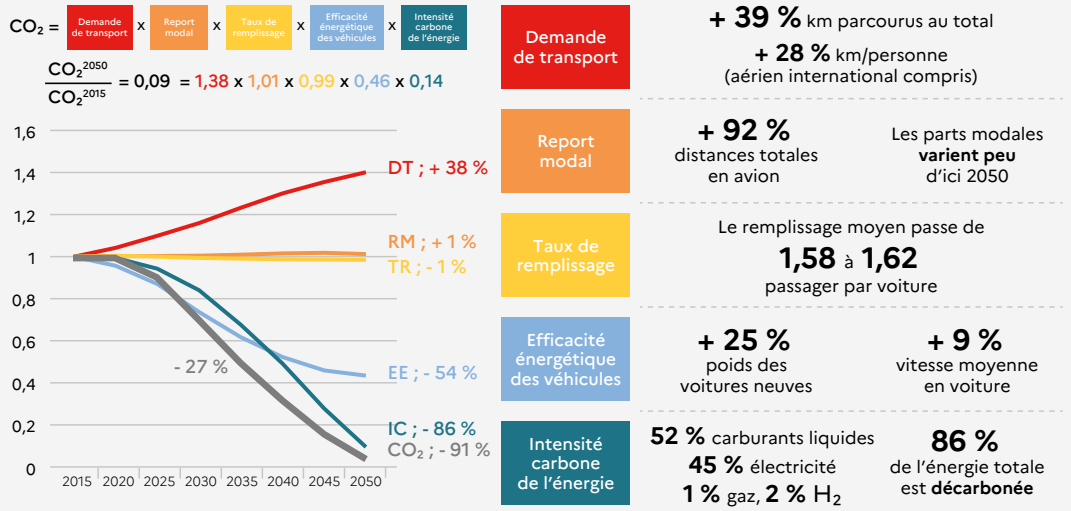
Enfin, les biocarburants de deuxième génération et les carburants avancés (dont les *electrofuels*) complètent le mix énergétique de ces modes routiers.

5.5. Scénario 4 : la technologie s'immisce dans les moteurs et la gestion des mobilités

Dans le scénario 4, les principaux facteurs de transformation sont **les nouvelles technologies, le numérique et la recherche de gains de temps et de vitesse** dans le quotidien, en particulier dans les comportements de mobilité. Les multinationales, notamment étrangères, prennent un rôle de leader des transformations économiques et énergétiques. La place des grands acteurs du numérique est croissante et se manifeste dans le développement des véhicules connectés et autonomes, des outils de communication à distance ou du e-commerce, qui ont un impact sur les comportements.

MOBILITÉ DES PERSONNES

Graphique 15 Résumé des principales évolutions du scénario 4 voyageurs entre 2015 et 2050



DEMANDE

La recherche de vitesse et l'optimisation des temps de transport comme guides

La mobilité est vue comme un facteur de liberté. La croissance de la demande de mobilité est un symbole d'émancipation pour la population qui multiplie ses possibilités d'activités. Pour limiter les inconvénients des temps de déplacements potentiellement en hausse si les distances parcourues augmentent, trois principaux leviers sont développés pour optimiser les temps de transport :

- **le premier** d'entre eux est celui de la vitesse. La recherche de gains de temps est constante. Les applications numériques permettent d'éviter les périodes ou les lieux de congestion ; l'adaptation et la gestion dynamique des infrastructures intensifient les flux ;
- **le deuxième levier** est de pouvoir occuper son temps de transport par d'autres activités, ce qui est facilité en particulier par l'automatisation progressive des véhicules sur les autoroutes ou dans les embouteillages. Les véhicules ont tendance à évoluer en « bureaux roulants » ;
- **le troisième levier** est une optimisation des temps du quotidien par le numérique. Certaines activités se font de plus en plus à distance, que ce soit par le développement du télétravail, de la télémédecine, des loisirs à distance ou du e-commerce. Ces évolutions permettent de limiter le nombre de déplacements, en particulier pour les classes de population les plus aisées, dans un contexte où les inégalités sociales et territoriales ont tendance à s'accentuer.

La tendance à la baisse du nombre de déplacements au quotidien ne touche pas toutes les catégories de la population avec la même ampleur. De plus, elle est plus que compensée par la **hausse des distances moyennes de déplacement**, qui portent les distances totales à la hausse. Au quotidien, l'aménagement du territoire et la poursuite de l'étalement urbain augmentent la longueur moyenne des déplacements,

en les rendant également fortement dépendants à la voiture. Les drives se développent pour les livraisons qui ne se feraient pas directement à domicile. Les moindres temps de transport au quotidien ainsi que la flexibilité des lieux de travail apportée par le développement des outils numériques ont pour effet de favoriser les déplacements à plus longue distance, pour des week-ends prolongés ou des vacances, en particulier chez les personnes les plus aisées. Le tourisme est mondialisé, avec une forte hausse des voyages en avion, y compris pour de courts séjours.

REPORT MODAL

L'ensemble des modes de transport motorisés en croissance

Les plus grandes métropoles se transforment en prenant la direction des ***smart cities*** **ou villes connectées**. Elles ont recours aux technologies numériques pour améliorer la gestion du trafic ou d'autres activités économiques.

La marche et les piétons sont relativement oubliés dans les transformations urbaines, mais de nouveaux services de mobilité émergent pour rendre leurs trajets plus rapides, avec de moindres efforts. Ainsi, se développent différents types d'engins de déplacements personnels motorisés (EDPM) partagés tels que les trottinettes, les vélos à assistance électrique ou d'autres véhicules nouveaux. Ces engins sont essentiellement présents dans le centre des plus grandes villes où les acteurs réussissent à rendre leurs services rentables. L'espace public, pensé essentiellement comme un espace de circulation qu'il faut réussir à accélérer, voit de plus en plus d'escalators ou de tapis roulants dans les zones les plus denses essentiellement accessibles à pied. La mobilité active diminue, au profit des véhicules et des modes motorisés. Enfin, les trottoirs sont parfois adaptés pour l'utilisation de robots livreurs autonomes servant également de lieux d'expérimentations pour d'autres configurations (zone de stationnement dédiée aux livraisons et chargements, entrepôts…) ou applications (guidage, surveillance, etc.).

La place de la voiture en ville est surtout régulée par la congestion et le manque d'espace des zones les plus denses, qui peuvent conduire sur certaines zones à des restrictions pour les voitures, au profit des véhicules très légers électriques ou des navettes autonomes partagées. Partout ailleurs, la voiture individuelle reste prédominante, avec la promesse des constructeurs automobiles et des acteurs du numérique de l'orienter vers des **véhicules électriques, connectés et autonomes**. Les constructions d'infrastructures routières restent par ailleurs soutenues, que ce soit les routes communales pour relier les nouveaux lotissements ou zones d'activités en périphérie des villes, les projets d'autoroutes ou bien quelques adaptations des infrastructures existantes au véhicule autonome et aux possibilités de recharge rapide des véhicules électriques.

Le développement des transports en commun reste soutenu, mais essentiellement pour les modes massifiés, rapides et qui ne demandent pas trop de soutiens publics. L'ouverture à la concurrence, de plus en plus forte, pousse les opérateurs à différencier leurs offres selon les catégories de population : vers un modèle *low cost* pour attirer les ménages modestes ou vers des offres premium ou haut de gamme avec de nombreux services proposés pour les plus aisés. Ainsi, les bus et les cars sont utilisés essentiellement par les populations les moins aisées, en général par les ménages démotorisés pour les transports du quotidien et pour s'offrir des voyages à moindre coût. La recherche de rentabilité économique des transports en commun pénalise les offres fortement dépendantes des financements publics, avec une tendance à la baisse de l'offre des TER les moins fréquentés. Les trafics ferroviaires du quotidien sont dynamiques principalement à l'intérieur des métropoles, que ce soit pour les métros ou les services express métropolitains. Entre les grandes villes, le trafic TGV est également dynamique, avec de nombreux opérateurs qui se font concurrence. Enfin, dans le but d'accélérer les innovations sur les transports rapides, des tests d'Hyperloop et de trains à très grande vitesse sont réalisés.

Le mode de transport rapide sur longue distance par excellence reste **l'avion, qui poursuit sa forte croissance**, portée par des extensions d'aéroports et un désir de voyages lointains. L'innovation de l'aérien progresse vers la décarbonation : en combinant les leviers de renouvellement de la flotte et d'efficacité, ainsi qu'en promouvant le développement de l'offre de carburants renouvelables et les technologies de propulsions adaptées.

REMPLISSAGE

La voiture individuelle dominante, l'essor de véhicules autonomes partagés

Le remplissage moyen des voitures fait face à des tendances opposées. D'un côté, la voiture individuelle continue de s'imposer comme le mode de transport incontournable, l'évolution des comportements et le faible coût des kilomètres parcourus en véhicule électrique n'encourageant pas à la mutualisation des trajets au quotidien. De l'autre côté, les ménages les plus précaires n'auront pas les moyens de passer aux véhicules électriques pendant longtemps et sollicitent fortement les services de covoiturage pour les trajets de longue distance, mais aussi de plus en plus pour les trajets du quotidien, une plateforme numérique réussissant finalement à s'imposer sur ce créneau.
L'essor des véhicules autonomes renforce l'appétence des plus riches pour un véhicule individuel dans

lequel ils peuvent désormais occuper une partie de leur trajet à d'autres activités de travail ou de divertissement. Pour rendre les services partagés attractifs et offrir une grande disponibilité en véhicules, des véhicules autonomes peuvent également être en rotation sans passager ce qui dégrade le taux de remplissage moyen. Dans le même temps, des acteurs du numérique s'allient aux constructeurs automobiles pour proposer des **véhicules autonomes partagés**, proches de la voiture, de la navette ou même du bus, et séduisent une partie des usagers pour les zones où les flux sont suffisamment denses. Bien que ces véhicules fassent des parties de trajets à vide ou avec un unique passager, ils ont tendance à porter à la hausse le remplissage moyen des voitures.

Des systèmes d'autopartage en libre-service se développent en ville, sans toutefois conduire à une forte démotorisation des ménages en dehors des centres-villes.

Dans le même temps, des systèmes d'autopartage en libre-service se développent en ville, sans toutefois conduire à une forte démotorisation des ménages en dehors des centres-villes. Ces flottes partagées fournissent un service utile pour les ménages non motorisés habitant des zones denses ou un service complémentaire à la possession de la voiture pour les autres ménages, par exemple pour faire des trajets porte-à-porte en train de manière simplifiée.

EFFICACITÉ

L'automatisation et la connectivité ont des effets contrastés sur l'efficacité

L'hybridation et le passage à la motorisation électrique constituent le principal levier d'efficacité énergétique des véhicules.

Au-delà de ces évolutions des moteurs, la mobilité autonome a des effets contrastés sur l'efficacité des véhicules. Elle a des effets positifs par une conduite plus progressive, une vitesse réduite dans les zones incertaines ou au moindre danger et un respect strict des limitations de vitesse, qui réduisent les consommations d'électricité. À l'inverse, l'efficacité des véhicules est pénalisée par les effets rebonds potentiels, par les multiples capteurs et les transferts de données liés à l'assistance et à l'automatisation de la conduite, de même que de nombreuses options visant à favoriser le confort et les possibilités d'activités en route. Au-delà de l'accroissement potentiel de la demande de transport, un impact défavorable est à craindre sur les consommations d'énergies au niveau des datas centers (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*). Surtout, **les voitures deviennent plus lourdes**, portées par les mêmes facteurs que par le passé, à savoir une hausse de la taille des véhicules, l'ajout de diverses options et d'équipements de sécurité, mais aussi par l'électrification et le poids des batteries, dans une volonté d'offrir toujours plus d'autonomie. La recherche de vitesse pousse à accélérer la circulation, notamment pour rehausser la vitesse sur certaines routes actuellement à 80 ou 110 km/h, parfois avec l'argument des moindres erreurs de la conduite assistée ou autonome, dont les véhicules sont de plus en plus équipés.

DÉCARBONATION

Des progrès importants sur les batteries facilitent le passage à l'électrique

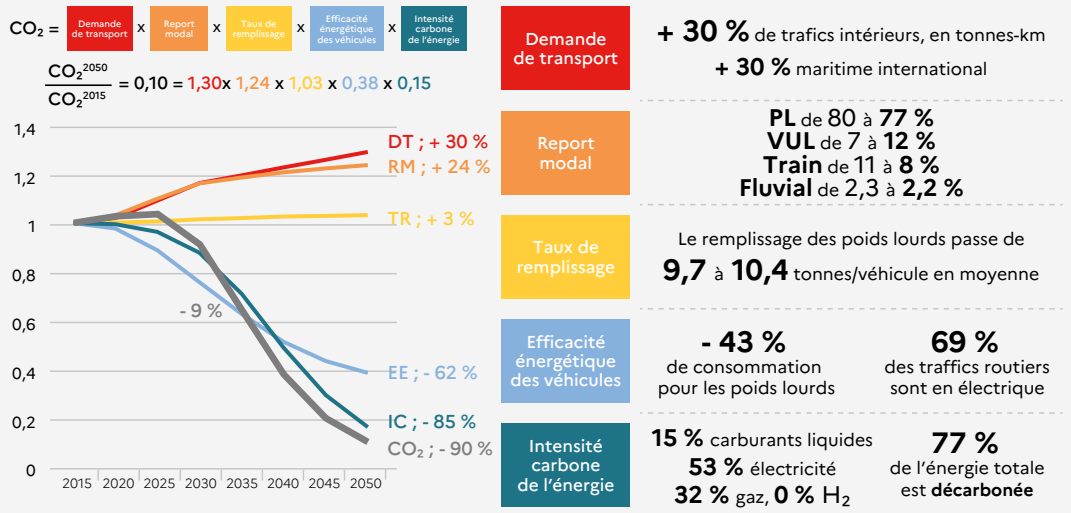
L'électrification est vue comme un levier majeur de décarbonation pour l'économie. C'est le cas dans les transports, avec en particulier une transition accélérée du parc de voitures vers l'électrique. Les progrès importants sur le coût et les caractéristiques techniques des batteries sont utilisés pour augmenter l'autonomie des véhicules, avec des conséquences en termes d'augmentation de quantités de ressources consommées. Associés à un vaste réseau de recharges rapides, ils permettent de s'affranchir rapidement des résistances des usagers à leur adoption.

Les autres vecteurs énergétiques sont relativement peu sollicités pour le transport de voyageurs, au vu de la domination de l'électrique. Le biogaz représente encore une part significative pour les autocars en raison des usages longues distances mais n'est que faiblement présent pour les autobus, pour lesquels l'électrique est dominant. L'hydrogène complète le mix énergétique de ces transports en commun, selon les choix et les possibilités d'écosystèmes locaux pour mutualiser les usages avec d'autres activités.

Les carburants liquides précédemment dérivés du pétrole **gardent une part importante uniquement dans le transport aérien**, en raison de la forte hausse des trafics. La volonté d'innovation accélérée ne suffit pas à décarboner complètement le secteur d'ici 2050. Les carburants liquides restent largement dominants, en particulier pour les long-courriers où les alternatives n'arrivent pas à temps et ce sont essentiellement les biocarburants et plus faiblement les carburants synthétiques (e-fuels) qui permettent de réduire la part de kérosène fossile pour ces trajets. Sur les plus courtes distances, ou pour l'aviation de loisirs ou les jets privés, l'électrique et l'hydrogène s'imposent progressivement, bien que cela représente des volumes relativement faibles sur le total des consommations du transport aérien.

TRANSPORT DE MARCHANDISES

Graphique 16 Résumé des principales évolutions du scénario 4 marchandises entre 2015 et 2050



DEMANDE

Des flux en hausse pour une logistique de plus en plus mondialisée et à flux tendus

L'évolution de la demande de marchandises se fait dans un contexte économique global de croissance soutenue. La mondialisation va de pair avec une économie spécialisée, la tertiarisation de l'économie française se poursuit et les entreprises multinationales, souvent étrangères, occupent un rôle important dans l'économie et sa décarbonation. Elles jouent notamment un rôle majeur dans la logistique, en raison de la position dominante sur certains segments du marché de la distribution. Leur capacité d'investissement dans les innovations technologiques et le numérique permet de développer la mobilité autonome. C'est le cas des poids lourds, des trains ou des opérations d'automatisation dans les centres logistiques ou pour développer des applications de drones ou de robots livreurs.

Les entreprises et les consommateurs tournent leurs attentes vers la minimisation des coûts, mais aussi vers la rapidité des livraisons. Cela se caractérise par une augmentation et une forte fragmentation des flux en particulier sur les derniers kilomètres, des stocks limités et des chaînes logistiques à flux tendus. Dans ce contexte, **le e-commerce devient le canal principal de distribution** de nombreux biens de consommation et marginalise certains magasins physiques qui ne se sont pas adaptés à cette tendance, en particulier pour certains commerces de taille limitée en centre-ville. Le commerce est plus dynamique dans les périphéries où continuent de se construire des entrepôts logistiques de plus en plus automatisés et où des centres commerciaux dynamiques ont réussi à s'adapter en hybridant leur modèle avec plusieurs modes de distribution (livraison à domicile, drive, commerce physique avec caisses automatisées, etc.).

La hausse des flux intérieurs (en tonnes-kilomètres transportées) est le résultat essentiellement de la hausse de la longueur des chaînes logistiques des biens manufacturés ou de l'industrie agroalimentaire et de celle des distances moyennes parcourues par les marchandises. Les quantités transportées sont à peu près stables au global avec, selon les secteurs, des flux en hausse (produits manufacturés), relativement stables (alimentation, minerais et industrie) ou en baisse (matériaux de construction).

Les flux du commerce international sont aussi particulièrement dynamiques, hormis pour les flux d'énergies fossiles, dont la baisse n'est que partiellement compensée par des importations en hausse d'énergies décarbonées (biomasse ou hydrogène, notamment).

REPORT MODAL

Le transport routier toujours plus prédominant

Le transport routier de marchandises impose toujours plus sa prédominance dans le système de transport. Les poids lourds restent le mode privilégié pour la moyenne et la longue distance. La hausse des trafics est similaire dans le fluvial qui se trouve porté par l'ouverture du canal Seine Nord Europe et la hausse du trafic de conteneurs. Dans le même temps, le fret

ferroviaire se concentre sur les axes les plus empruntés tandis que certaines petites lignes perdent en qualité de service ou sont fermées à la circulation. Les trafics ferroviaires sont stables, ce qui donne une part modale en légère baisse, en raison de la croissance de la demande totale. Sur la courte distance, la cyclologistique se développe dans le centre des métropoles, assurée essentiellement par des autoentrepreneurs qui sont chargés de réaliser des livraisons rapides en évitant la congestion routière. Ailleurs, ce sont surtout les véhicules utilitaires légers qui sont en croissance et assurent la livraison des derniers kilomètres.

De nombreuses solutions technologiques tentent d'être déployées pour assurer une livraison rapide et autonome (drones, robots livreurs, navettes fluviales, etc.), mais n'investissent généralement que des marchés de niche en raison de la difficulté à circuler dans l'espace public sans entraîner de nombreux conflits avec les autres usagers.

REMPLISSAGE

Le juste-à-temps fragmente les envois malgré les optimisations numériques

La place croissante du numérique et de l'automatisation sont les principaux ressorts utilisés pour essayer d'améliorer le taux de remplissage des véhicules pour les différents modes de transport de marchandises.

Mais une tendance plus négative est à l'œuvre : celle de la généralisation du juste-à-temps et des livraisons rapides, qui limitent la possibilité d'organiser la mutualisation des marchandises. Cette tendance pénalise les modes lourds que sont le ferroviaire et le fluvial et favorise le transport routier qui est plus flexible. Elle encourage aussi l'utilisation de véhicules utilitaires légers à la place des poids lourds et limite le remplissage de ces véhicules de livraison qui sont moins remplis en moyenne. Cependant, cette **fragmentation des livraisons** a ses limites, notamment en termes de coûts économiques pour les opérateurs. En conséquence, elle ne se développe pas sur tous les segments de marché, les envois massifs étant privilégiés quand cela est possible et qu'il n'y a pas de valeur ajoutée particulière à la fragmentation des envois ou à la livraison très rapide.

EFFICACITÉ

Des gains essentiellement par l'électrification des véhicules

Le scénario est celui d'une forte électrification des flottes, y compris pour une part importante des poids lourds. Les principaux gains d'efficacité en énergie finale consommée proviennent ainsi de ce passage aux véhicules hybrides, aux hybrides rechargeables puis aux véhicules électriques. Cette électrification progressive est poussée par les différents acteurs économiques de l'énergie, de la logistique et par les pouvoirs publics.

DÉCARBONATION

Des accélérations technologiques limitées par les ressources disponibles

La croyance dans les bienfaits de la technologie fait de la décarbonation de l'énergie le levier privilégié de la transition énergétique, loin de toute volonté de contraindre la demande.

L'électrification en particulier fait partie des piliers de la transformation technologique, qui vise des transports intelligents, autonomes, connectés et zéro émission. Le déploiement quasiment généralisé de la traction électrique est facilité par les progrès importants sur les coûts des véhicules et en particulier des **progrès importants sur les batteries**, qui permettent d'augmenter l'autonomie et les emports de marchandises. Ces autonomies sont complétées par un réseau dense d'infrastructures de recharge dont des réseaux de recharges rapides adaptées pour des usages de transport de marchandises.

Au-delà de l'électrique, c'est essentiellement le biogaz qui fournit une part importante du trafic de poids lourds sur la longue distance. L'hydrogène a une pertinence limitée en raison du fait que sa production décarbonée consomme plus d'électricité que l'équivalent énergétique dans un moteur électrique. Enfin, les biocarburants se développent pour limiter les émissions liées aux carburants liquides, qui restent significatifs dans les consommations d'énergie à l'horizon 2050.

Au sein du transport de marchandises, c'est surtout dans le transport maritime que le pétrole garde une place importante, malgré le développement des biocarburants.

6. Grande variabilité de la demande entre les scénarios

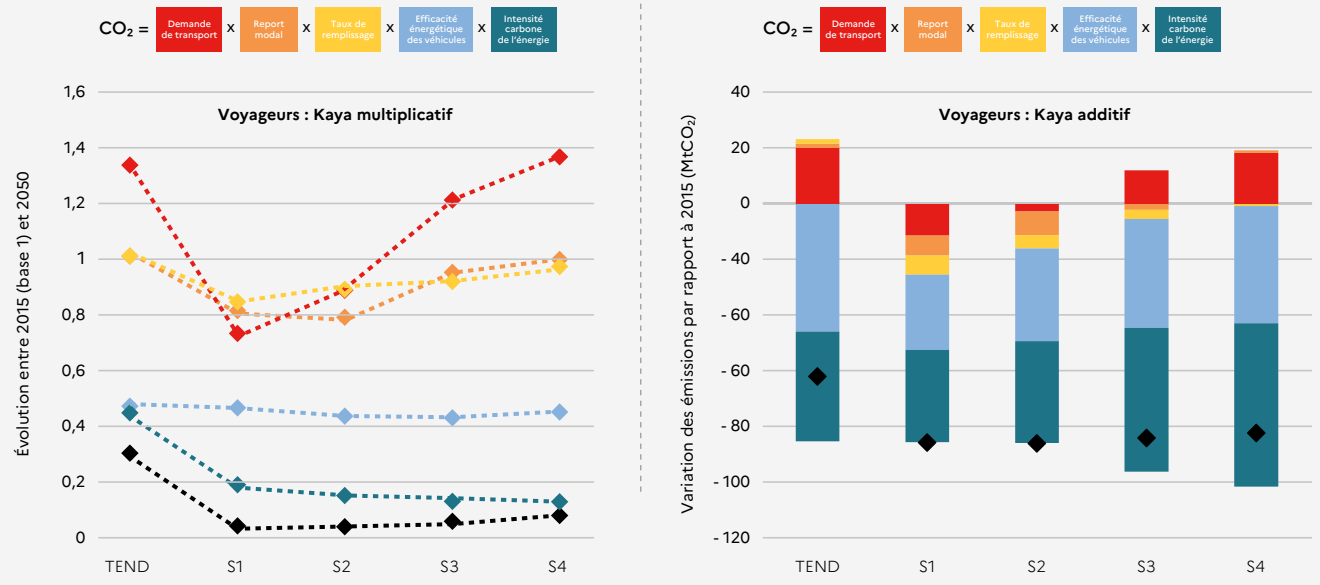
ÉVOLUTION DES 5 LEVIERS DE LA TRANSITION

Au début de la présentation de chaque scénario, la décomposition Kaya des scénarios en cinq leviers montre la façon dont ces leviers participent à l'évolution des émissions de CO_2. Les résultats sur les émissions pour le scénario tendanciel et les quatre scénarios de neutralité carbone sont regroupés dans le *Graphique 17*, à la fois sous forme multiplicative (évolution par rapport à l'année de référence à gauche) et sous forme additive (évolution des émissions en $MtCO_2$ sur la période, entre 2015 et 2050 à droite).

Les contrastes les plus importants apparaissent sur les premiers leviers de la décomposition, en particulier sur la demande de transport.

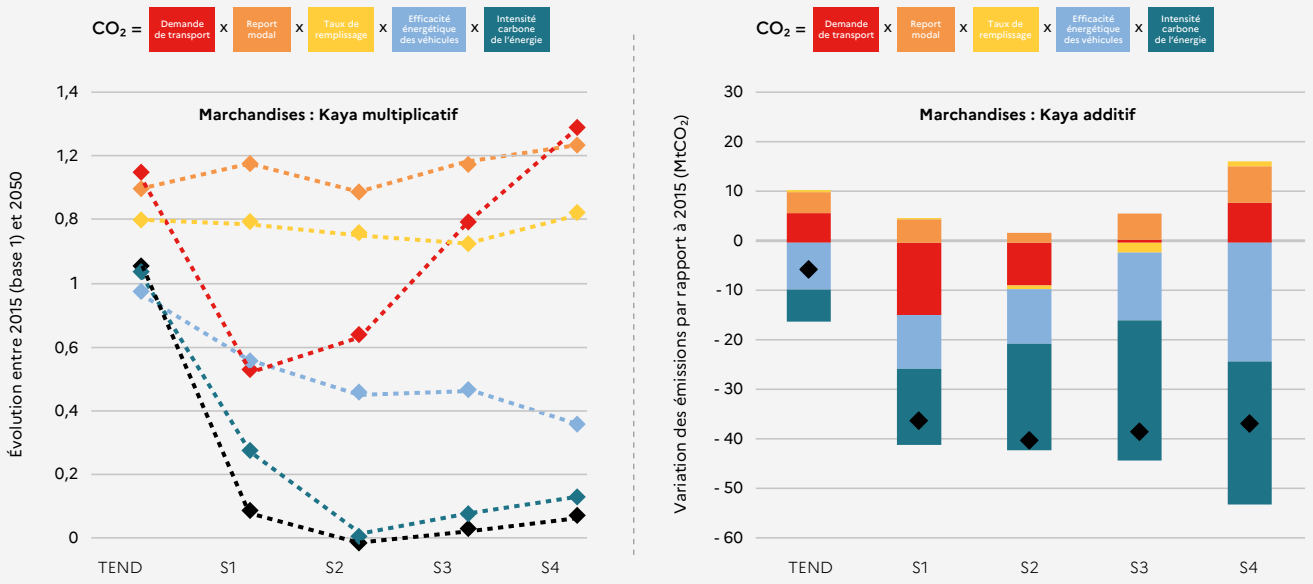
Des tendances similaires apparaissent également pour le transport de marchandises *(Graphique 18)*. L'impact du report modal à la hausse sur les émissions s'explique essentiellement par la part croissante des véhicules utilitaires légers, moins efficaces que les poids lourds par tonne transportée, dans le total des trafics.

Graphique 17 Décompositions Kaya de l'évolution des émissions entre 2015 et 2050 pour le transport de voyageurs (aérien international inclus), formes multiplicative et additive



Note de lecture : les évolutions totales correspondent aux points noirs dans le graphique de droite.

Graphique 18 Décompositions Kaya de l'évolution des émissions entre 2015 et 2050 pour le transport intérieur de marchandises, formes multiplicative et additive

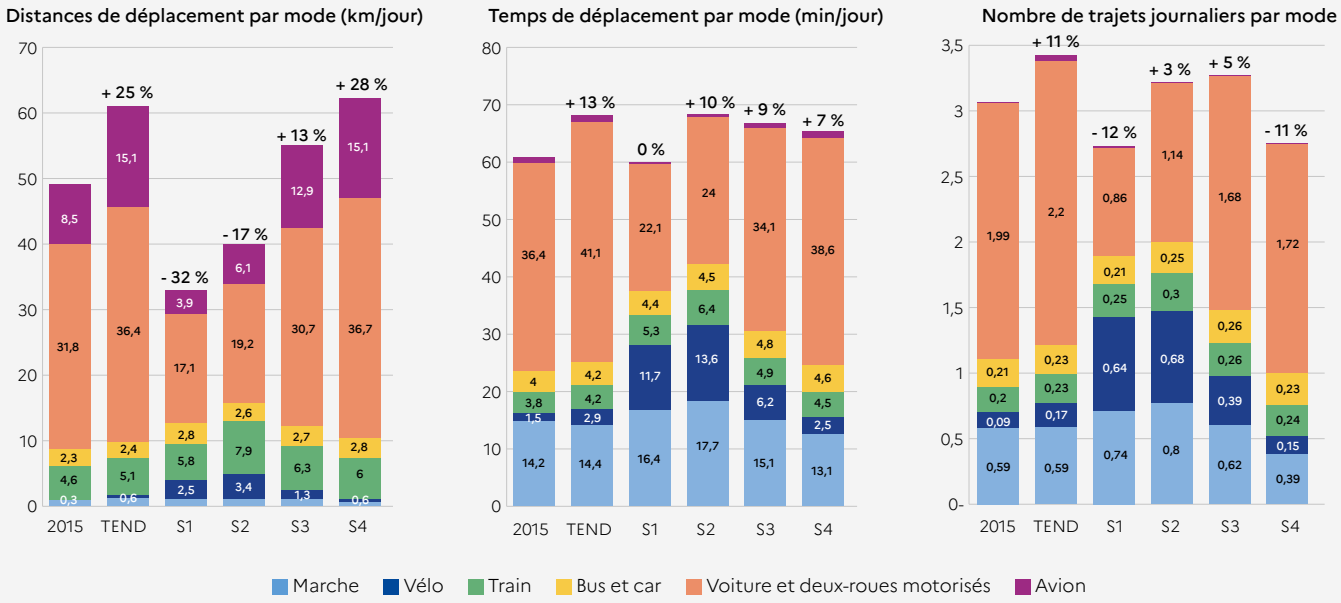


Note de lecture : les évolutions totales correspondent aux points noirs dans le graphique de droite.

ÉVOLUTIONS DE LA DEMANDE

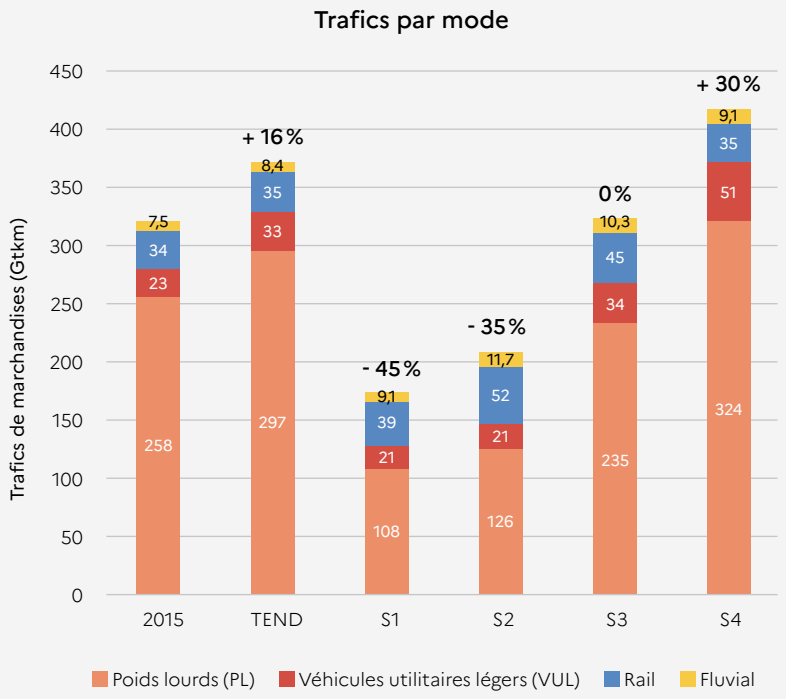
La demande de transport de voyageurs est principalement mesurée en kilomètres parcourus pour les quantifications énergétiques. Ce critère diffère singulièrement selon les scénarios. Il recule de 26 % (y compris aérien international) dans S1 et augmente de 39 % dans S4 (soit - 30 à + 30 % en kilomètres par personne *Graphique 19*). Les contrastes dans l'évolution des **temps de transport** par personne sont bien moins forts et sont maximaux pour les scénarios tendanciel et S3, tout comme le **nombre de trajets** par personne qui apparaît légèrement plus contrasté selon les scénarios. Le **report modal** depuis la voiture est bien visible sur tous les critères pour S1 et S2, scénarios dans lesquels la baisse de l'aérien est également bien visible en distances parcourues. Le report vers le vélo est bien visible en temps de déplacement et en nombre de trajets. Les reports sont plus faibles dans les scénarios tendanciels, S3 et S4, avec comme principal fait marquant une hausse sensible de la part des distances parcourues en avion.

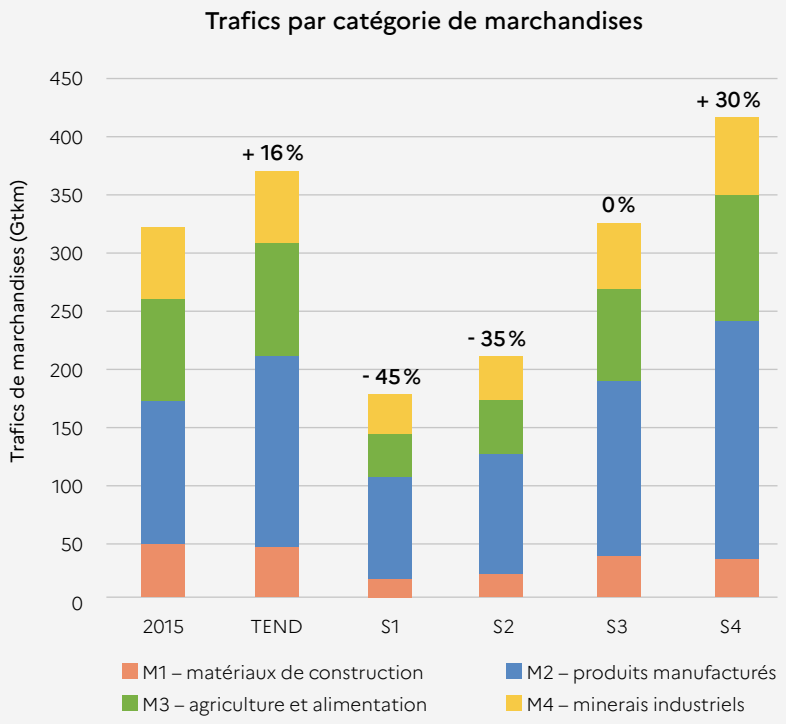
Graphique 19 Évolution de la demande voyageurs en 2015 et en 2050 selon les scénarios, en distance, temps de transport et nombre de trajets moyens par personne et par mode



Pour la demande de transport de marchandises, des tendances similaires sont visibles sur la demande totale, avec une demande en retrait important pour S1 et S2 (respectivement - 45 % et - 35 %), constante pour S3 et en hausse de + 30 % pour S4. Les contrastes dans les trafics entre les scénarios sont visibles pour les différentes catégories de marchandises. De nouveau, le report modal est maximal pour les scénarios 1 et 2 en pourcentage des trafics (22 % et 25 % de part modale du ferroviaire en 2050 notamment).

Graphique 20 Évolution du transport de marchandises en 2015 et en 2050 selon les scénarios et taux d'évolution par rapport à 2015 par mode (en haut) et par catégorie de marchandises (en bas)

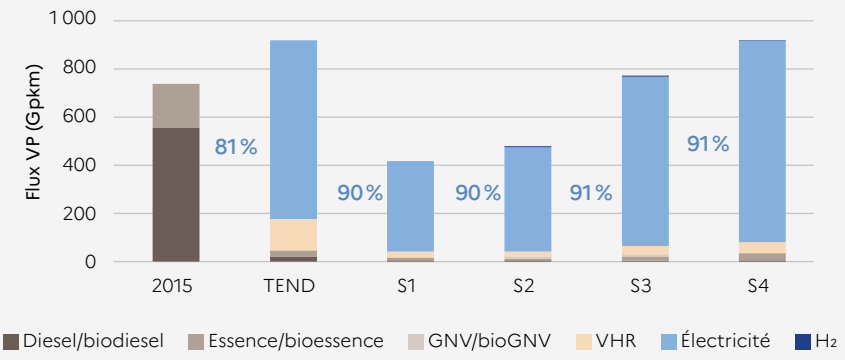




STRUCTURE DU MIX ÉNERGÉTIQUE POUR LES PRINCIPAUX MODES EN 2050

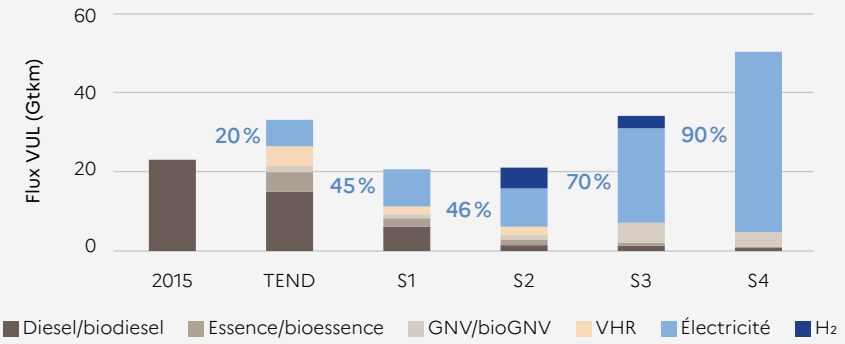
Les *Graphiques 21* à *23* présentent la part du vecteur énergétique considéré respectivement pour les passagers-kilomètres et les tonnes-kilomètres réalisés par les voyageurs et les marchandises.

Graphique 21 Mix énergétique et part de l'électricité pour les voitures particulières dans les différents scénarios en 2050



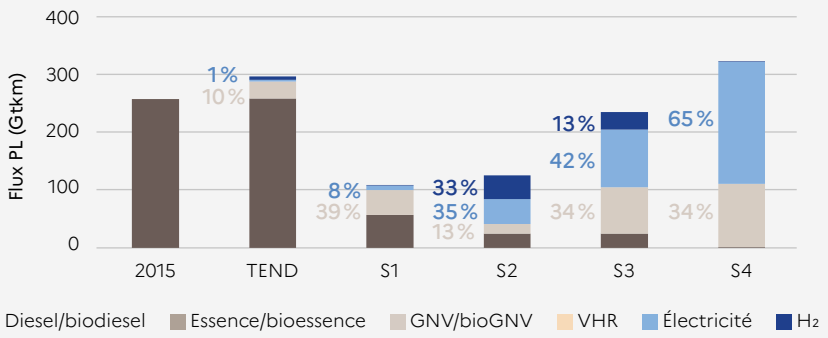
VHR : véhicules hybrides rechargeables.

Graphique 22 Mix énergétique et part de l'électricité pour le transport de marchandises par les VUL dans les différents scénarios en 2050



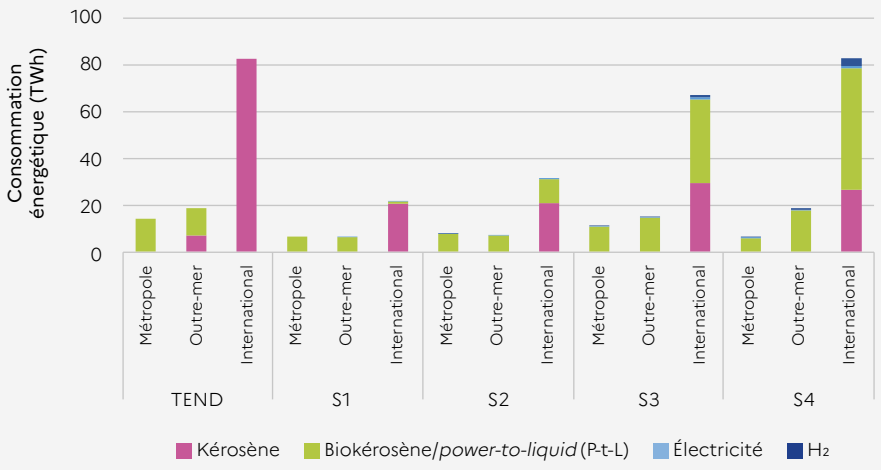
VHR : véhicules hybrides rechargeables.

Graphique 23 Mix énergétique et part de l'électricité, du gaz et de l'H2 pour le transport de marchandises par les poids lourds dans les différents scénarios en 2050



VHR : véhicules hybrides rechargeables.

Graphique 24 *Consommation énergétique pour le transport aérien pour les différents scénarios en 2050*



L'évolution vers l'électromobilité est la plus marquée et la plus rapide pour les véhicules particuliers, avec au final en 2050 un mix énergétique qui diffère peu entre les scénarios hormis le vecteur gazeux (GNV et H_2) dans S2 et S3. La différence est essentiellement marquée en valeur absolue sur les niveaux de demande pour la mobilité en véhicules particuliers.

L'évolution est **plus diversifiée dans le cas du transport de marchandises**, particulièrement pour les poids lourds rigides et articulés pour lesquels le recours à des vecteurs à forte densité énergétique (permettant de maximiser la capacité d'emport) et/ou se prêtant à des remplissages rapides (gaz et H_2) s'avère nécessaire pour certains usages comme les longues distances.

PARC DE VÉHICULES

Pour illustrer d'une manière quantitative les situations contrastées qu'induisent les hypothèses des scénarios, nous présentons ci-après les niveaux de ventes pour les catégories VP et VUL et les **transformations des parcs** correspondants envisagés.

N.B. : les hypothèses sur les usages et remplissages utilisées pour ces simulations ne sont pas présentées dans cette synthèse, elles seront fournies dans le cahier d'hypothèses.

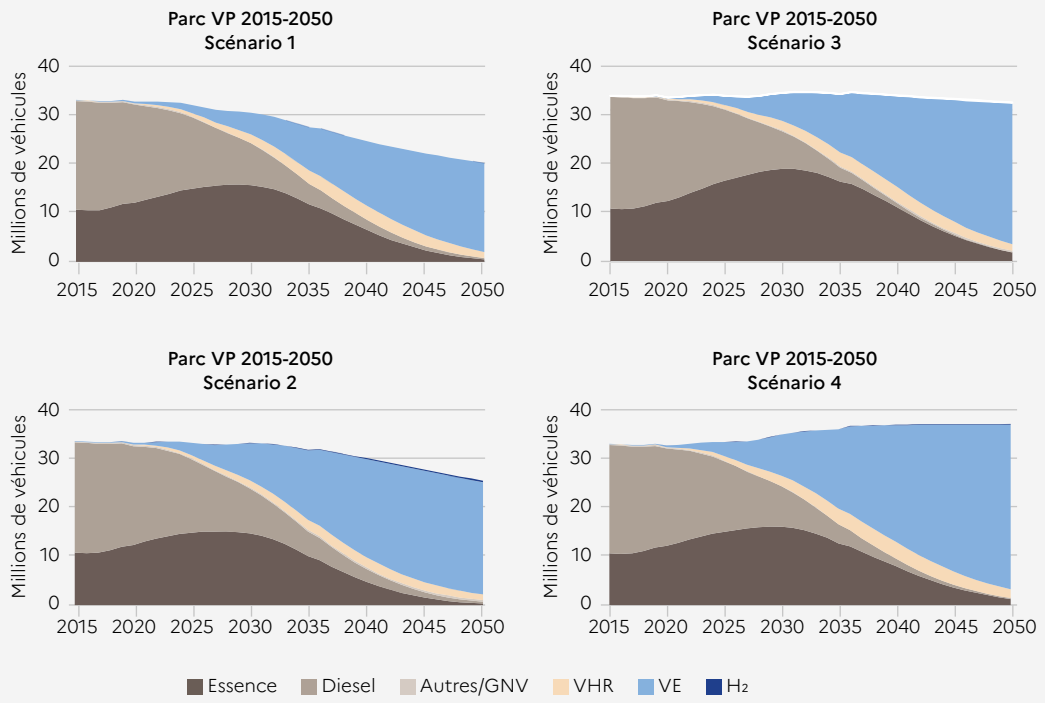
Tableau 7 *Évolution 2015-2050 des ventes de voitures particulières neuves selon les scénarios*

	Immatriculations de voitures particulières neuves							
Scénarios	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TEND	1 917 223	1 650 117	2 329 481	2 430 054	2 442 229	2 454 464	2 466 761	2 479 120
S1	1 917 223	1 650 117	1 838 115	1 573 949	1 433 501	1 305 585	1 189 084	1 082 978
S2	1 917 223	1 650 117	2 050 429	1 923 192	1 764 736	1 619 336	1 485 915	1 363 488
S3	1 917 223	1 650 117	2 135 745	2 072 437	2 031 319	1 991 016	1 951 513	1 912 794
S4	1 917 223	1 650 117	2 261 906	2 302 382	2 304 109	2 305 838	2 307 568	2 309 299

Tableau 8 *Évolution 2015-2050 des ventes de véhicules utilitaires légers neufs selon les scénarios*

	Immatriculations de véhicules utilitaires légers neufs							
Scénarios	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
TEND	377 731	360 000	495 726	510 778	526 286	542 265	558 729	575 694
S1	377 731	360 000	423 443	382 601	412 259	393 568	375 723	358 688
S2	377 731	360 000	455 747	437 807	420 572	404 017	388 112	372 834
S3	377 731	360 000	491 308	502 462	513 870	525 536	537 468	549 670
S4	377 731	360 000	551 723	621 503	588 502	627 917	669 972	714 844

Graphique 25 Transformations 2015-2050 des parcs automobiles selon le scénario considéré

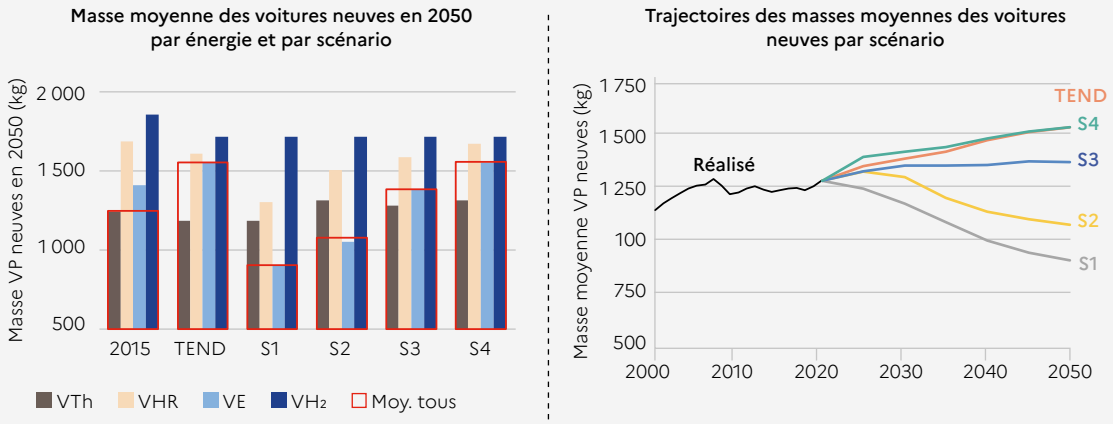


VHR : véhicules hybrides rechargeables, VE : véhicules électriques.

CARACTÉRISTIQUES DES VÉHICULES COMMERCIALISÉS

Pour documenter l'évolution des efficacités énergétiques au-delà de l'effet des technologies (gains incrémentaux et pénétration des différentes motorisations), une analyse complémentaire a été menée sur les **gabarits des véhicules** (trois classes de taille : *small*, *medium* et *large*) et la **masse des véhicules neufs**. Ces éléments ont également permis d'analyser les masses dédiées aux batteries pour les VHR et VE notamment et d'alimenter les travaux en cours sur le volet ressources (feuilleton prévu pour 2022).

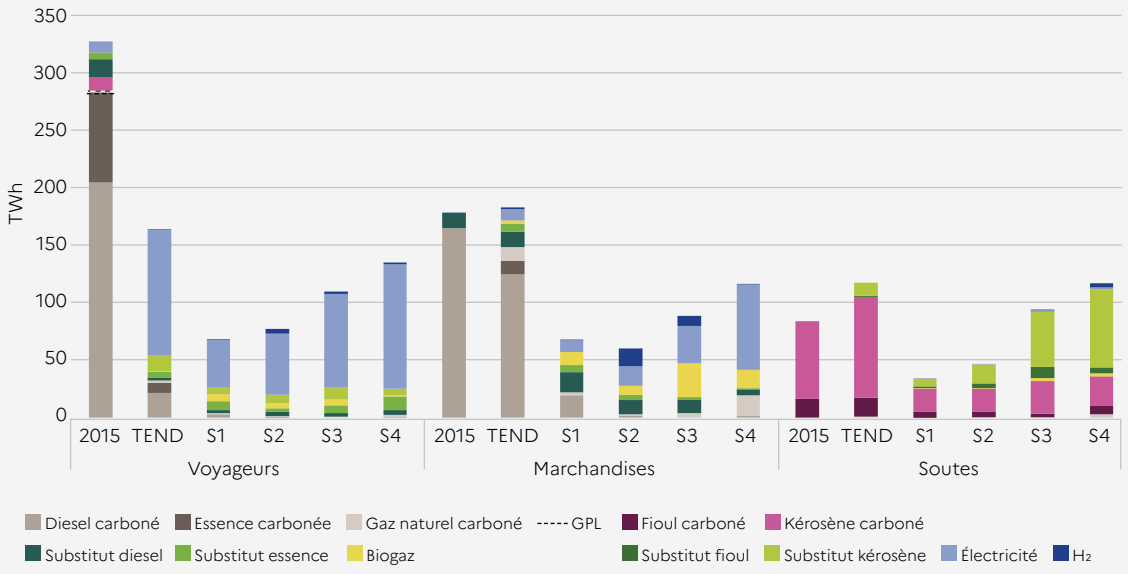
Graphique 26 Comparaison des masses moyennes des voitures neuves par technologie et par scénario en 2050 (à gauche) et évolution des masses moyennes globales pondérées par les ventes selon les scénarios (à droite)



VTh : voitures thermiques, VHR : véhicules hybrides rechargeables, VE : véhicules électriques, VH2 : voitures à hydrogène.

CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

Graphique 27 Demande énergétique des transports en 2050 par vecteur et par scénario (pour le transport de voyageurs, de marchandises et les soutes [transports internationaux])



Le *Graphique 27* fournit les résultats sur la demande énergétique en couplant l'estimation des consommations d'énergies résultant des hypothèses du secteur sur les différents leviers détaillés avec les données sur les vecteurs énergétiques décarbonés (biocarburants liquides et gazeux, électro-carburants, H_2, etc.) qui sont présentées dans les chapitres *2.3.1. Mix gaz* et *2.3.4. Carburants liquides*. On peut constater que les motorisations classiques deviennent largement minoritaires dans tous les scénarios en 2050. Le graphique montre par ailleurs la **grande variabilité des demandes d'énergies selon les scénarios**, notamment les niveaux parfois conséquents de demande en vecteur énergétique décarboné : de 52 à 185 TWh d'électricité sont appelés en utilisation directe pour la traction électrique selon le scénario considéré, auxquels il faudra rajouter jusqu'à environ 25 TWh d'électricité pour répondre à une demande en hydrogène produit par électrolyse (près de 20 TWh d'H_2 utilisé dans S2, après application du rendement de conversion). Pour les biocarburants liquides et le biogaz, les quantités utilisées varient respectivement de 49 à 101 TWh et de 13 à 35 TWh.

ÉMISSIONS DE GES DIRECTES POUR LE SECTEUR DES TRANSPORTS ET DE LA MOBILITÉ

Le *Graphique 28* présente les émissions de GES liées aux modes de transports pour l'ensemble des usages (mobilité voyageurs et transports de marchandises). Les niveaux présentés n'intègrent pas les émissions de GES liées à l'amont (production des énergies, productions des véhicules, des infrastructures) ni celles liées à la fin de vie des véhicules. Le graphique illustre les gains permis en combinant les différents leviers et plus particulièrement la réduction de la demande énergétique et la substitution par des vecteurs peu ou pas carbonés. Les émissions de GES résiduelles directes ainsi que celles qui sont comptabilisées dans d'autres secteurs d'activités (industrie, construction…) témoignent de la nécessité de mise en œuvre de puits carbone naturels ou technologiques selon les scénarios.

Au-delà de cette représentation d'ensemble de la réduction de GES pour le secteur des transports, le *Tableau 9* présente, sous la forme d'un **score de décarbonation** (pourcentage sur le total des consommations d'énergie), les niveaux obtenus de substitution par des énergies d'origine non fossile. Sont donc considérés ici comme décarbonés l'électricité, l'hydrogène (produit par électrolyse), le biogaz et les biocarburants. Les scores atteints mettent en lumière la part non négligeable restante à compenser en ne tenant compte, pourtant, que des émissions directes (*cf. 2.4.3. Puits de carbone*).

Graphique 28 Émissions directes de gaz à effet serre en 2050 pour les transports selon les différents scénarios et part d'évolution par rapport à 2015

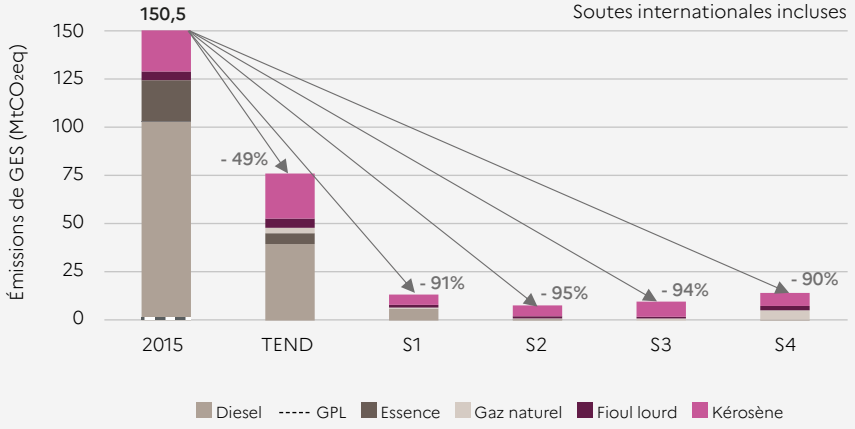


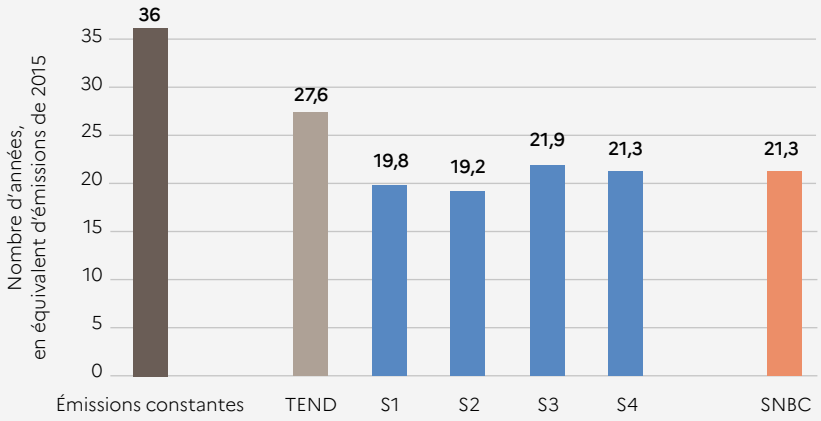
Tableau 9 Décarbonation de la demande énergétique pour le secteur des transports à l'horizon 2050 selon les scénarios

		Taux de décarbonation atteint du secteur des transports					
	Périmètre	2015	TEND	S1	S2	S3	S4
Voyageurs	Métropole	10,4 %	80,2 %	93,9 %	96,8 %	96,3 %	96,1 %
	TOTAL	8,5 %	54,5 %	79,9 %	84,7 %	87 %	86,5 %
Marchandises	Métropole	7,7 %	19,7 %	71,5 %	97,2 %	87,8 %	81,1 %
	TOTAL	7 %	17,9 %	65 %	91,4 %	89,5 %	76,8 %
Ensemble transports et mobilité	Métropole	9,4 %	46,7 %	82,5 %	97 %	92,3 %	89,2 %
	TOTAL	**8 %**	**38,2 %**	**73,3 %**	**87,3 %**	**88 %**	**83 %**

Au-delà de l'image à 2050, le **cumul d'émissions d'ici cette date** est un paramètre important pour l'évolution du climat, car il déterminera la quantité d'émissions émises dans l'atmosphère sur la période 2015-2050. Ce cumul est mesuré en équivalent d'années d'émissions de 2015 (soit 36 ans en cas d'émissions constantes d'ici 2050), afin de pouvoir être comparé avec la trajectoire de la SNBC, malgré un niveau d'émissions en 2015 légèrement différent.

Il apparaît *(Graphique 29)* que le scénario tendanciel émet 23 % de moins que le scénario fictif d'émissions constantes. C'est 41 % de moins dans la SNBC, ainsi que dans S3 et S4 ; c'est environ 46 % de moins dans S1 et S2. La différence avec la SNBC est que cette dernière prévoyait des baisses d'émissions dès la période 2015-2020, alors qu'elles sont ici constantes dans tous les scénarios. S1 et S2, qui possèdent les baisses d'émissions les plus rapides, ont le cumul d'émissions le plus faible, de l'ordre de 13 % de moins sur la période que S3, S4 et la SNBC. Ils sont aussi les seuls scénarios à respecter les budgets carbone de court terme de la SNBC (2019-2023, 2024-2028 et 2029-2033) à condition d'inclure la baisse de 2020 pour le budget 2019-2023. Ces budgets sont en revanche légèrement dépassés dans S3 et S4, d'environ 1 à 5 % pour chacune des trois périodes.

Graphique 29 Émissions de CO_2 des transports intérieurs cumulées sur l'ensemble de la période 2015-2050, en nombre d'années d'équivalent aux émissions de 2015, comparé au cumul en cas d'émissions constantes (36 ans) et à la SNBC



ÉMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Une analyse qualitative a été conduite pour évaluer l'impact des scénarios sur l'évolution des émissions de polluants atmosphériques. Elle sera publiée dans le cadre d'un feuilleton en 2022.

La première analyse qualitative a été établie à partir des évolutions des trafics par catégorie de motorisation et des facteurs d'émission par kilomètre parcouru. **Les scénarios envisagés devraient réduire les émissions de combustion comme les oxydes d'azote (NOx) et les particules (PM)** des trafics routier et ferroviaire en 2050 par rapport au scénario de référence. Cela s'explique par la baisse conjointe des trafics des véhicules thermiques (et en particulier Diesel), ainsi que par la généralisation de véhicules moins émetteurs. Pour les particules, l'évolution des émissions hors échappement (abrasion des freins, pneus et chaussée) est plus incertaine et devra faire l'objet d'analyses plus approfondies sur les impacts possibles des réglementations à venir, de l'évolution des trafics ou encore du poids des véhicules. Concernant les transports fluvial, maritime, aérien domestique et international, tous les scénarios envisagés devraient réduire les émissions de NO_x et de PM en 2050 par rapport au scénario de référence.

7. Des transformations de rupture s'imposent

Les enseignements à tirer de ce travail sont, dans un premier temps, sur les points qui apparaissent comme incontournables pour tous les scénarios et dans un deuxième temps sur les politiques publiques structurantes qui sont spécifiques à chacun des scénarios, et dans un troisième temps les enseignements globaux à la lumière des résultats et des contrastes entre les scénarios.

Un premier enseignement commun à tous les scénarios concerne **les transformations très fortes et rapides à enclencher pour atteindre la neutralité carbone**, en rupture avec certaines tendances passées et actuelles. Au-delà des récits de transitions réussies qui sont décrits précédemment, les évolutions prévues témoignent de la difficulté de l'objectif, en cela qu'elles impliquent des changements majeurs à différents niveaux, plus ou moins prononcés selon les scénarios : évolution des modes de vie, des usages, des mentalités, de la gouvernance, de la fiscalité, des réglementations, des technologies, des modèles économiques, du partage de l'effort et des bénéfices entre les acteurs, etc. Ainsi la réussite de ces scénarios de transition des transports dépasse-t-elle largement ce seul secteur pour s'intégrer dans une approche systémique.

La décarbonation de l'énergie est un levier incontournable pour tous les scénarios.

L'évolution des motorisations est également un élément commun à tous les scénarios contrairement au niveau de la demande, aux comportements de sobriété ou à l'organisation des transports.

La **décarbonation de l'énergie est un autre levier commun**, bien que les progrès soient plus ou moins forts selon les scénarios. Les interactions avec le secteur de l'énergie montrent le besoin de s'appuyer sur la complémentarité des différentes énergies, la difficulté de la décarbonation du fait des contraintes techniques et économiques, la dépendance à l'adéquation entre l'offre et la demande d'une part, la contrainte sur les quantités de biomasse disponibles d'autre part. Les niveaux de décarbonation dans le secteur des transports dépendent également des niveaux de consommation d'énergie des transports et des autres secteurs, pointant l'importance des leviers de sobriété et d'efficacité énergétique pour faciliter la décarbonation du secteur. Enfin, les soutes internationales aériennes et maritimes sont les plus difficiles à décarboner dans tous les scénarios avec un recours résiduels aux énergies fossiles qui peut représenter du quart aux trois quarts de leurs demandes énergétiques. Ceci explique que le taux de décarbonation varie significativement selon que l'on prend en compte ou non ces soutes *(Tableau 9)*.

L'électrification apparaît en particulier comme un levier indispensable pour décarboner les véhicules légers. C'est le cas en particulier pour les voitures, avec un parc très largement électrifié en 2050 dans tous les scénarios, malgré des différences sur le rythme de déploiement ou la place laissée aux véhicules hybrides. L'électrique est aussi très présent pour les deux-roues motorisés et les vélos à assistance électrique. Il domine encore plus qu'actuellement le mix énergétique du ferroviaire, se développe de manière marquée pour les bus et de manière plus contrastée et croissante de S1 à S4 pour les véhicules utilitaires légers, les poids lourds et les autocars. En revanche, l'électrique n'est pas développé de manière significative dans les transports aériens et maritimes et très peu dans le fluvial.

Pour les modes dont une part très significative n'est pas électrifiée, **les carburants liquides, le gaz naturel véhicule et l'hydrogène se partagent le reste du mix énergétique**. Leur origine ou leur production étant encore largement dépendante des énergies fossiles aujourd'hui, il est indispensable d'assurer la décarbonation de ces vecteurs énergétiques et de veiller à ce que leur développement ne pérennise pas cette dépendance au fossile en raison de potentiels de production bas carbone insuffisants. C'est le cas pour les biocarburants et le biogaz, qui dépendent des ressources disponibles et de leur priorité d'affectation selon les scénarios. C'est également le cas pour l'hydrogène qui nécessite une montée en puissance des capacités d'électrolyse et des quantités importantes d'électricité bas carbone. Il faut ainsi veiller à ne pas développer trop vite les usages du gaz ou de l'hydrogène dans la mobilité au risque qu'une grande partie reste carbonée à l'avenir si la production décarbonée ne suit pas.

Au-delà de ces enseignements communs aux scénarios, **de nombreuses évolutions et politiques publiques sont spécifiques à certains scénarios**. Les plus structurantes sont :

Pour le scénario 1, il s'agit en particulier :

- de la modération des vitesses de circulation sur les routes avant 2025, accompagnée d'une reconversion progressive des infrastructures routières existantes pour favoriser les modes alternatifs à la voiture, et notamment la marche et le vélo ;
- la fin des subventions et des exonérations fiscales existantes sur les énergies fossiles et les modes intenses en énergie avant 2030, en particulier ceux qui sont les plus difficiles à décarboner tels que les poids lourds, le transport aérien ou le maritime ;
- l'évolution des normes et des réglementations sur les véhicules neufs, pour favoriser les véhicules les plus légers et les plus sobres (vitesse maximale, puissance du moteur, consommations et émissions, etc.), ainsi que la taxation au poids des véhicules neufs.

Pour le scénario 2, les politiques les plus structurantes incluent :

- des évolutions structurantes dans la fiscalité des transports, afin d'internaliser dans le prix des transports les différentes externalités, comme les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi pour prendre en compte d'autres coûts externes (congestion, accidentologie, usure des infrastructures, impacts sur la santé, ressources consommées, etc.) et ainsi favoriser les modes les plus durables sur plusieurs dimensions ;
- des transferts de moyens importants pour les collectivités afin d'accompagner les acteurs dans leur transformation vers la création d'écosystèmes de mobilité sobres en énergie et en ressources, ainsi que le développement d'énergies bas carbone adaptées au contexte local ;
- le lancement, grâce à ces moyens conséquents, d'un plan d'infrastructures efficaces pour les modes sobres (vélo, marche, ferroviaire, fluvial), ainsi que la transformation de l'espace public dans les villes et villages au bénéfice de ces modes et de territoires plus résilients.

Pour le scénario 3, il s'agit :

- de l'impératif de disposer d'une tarification du carbone efficace, permettant de taxer les technologies et les modes les plus polluants, afin d'inciter à leur décarbonation tout en dégageant des recettes indispensables au financement de la transition ;
- pour l'État, il s'agit ainsi de **financer une grande partie des investissements et la R&D** dans les technologies clés de la décarbonation et la transition des filières dépendant des énergies fossiles ;
- pour le secteur des transports, il s'agit en particulier de durcir la fiscalité pour accélérer le renouvellement du parc et la décarbonation de l'énergie utilisée, en recourant aussi aux normes et aux obligations d'incorporation quand cela est nécessaire.

Pour le scénario 4, les transformations accompagnées par l'État concernent notamment :

- l'importance d'investir dans les infrastructures de transport afin de gagner en capacité de transport pour faire face aux hausses de trafic et pour adapter les infrastructures au développement de la connectivité des systèmes de transport ;
- les politiques facilitant la connectivité des transports et le partage des données pour développer les véhicules autonomes et pour faire gagner en efficacité le système de transport ;
- la décarbonation est obtenue par un rôle précurseur des entreprises, encouragées par des cibles de niveaux d'émissions à atteindre, en incitant les engagements volontaires des entreprises et en mettant dans l'économie un signal prix suffisant pour orienter les décisions vers la décarbonation et favoriser les émissions négatives.

Les analyses transverses aux nombreux secteurs permettent aussi de différencier les scénarios sur leurs conditions de réalisation ou leurs impacts, qu'ils soient environnementaux, sociaux ou économiques. La décomposition des émissions de GES montre ainsi un **potentiel de réduction des consommations d'énergie de plus de la moitié par rapport au tendanciel en sollicitant seulement les leviers de sobriété**, à savoir la modération de la demande, le report modal et le remplissage des véhicules. Aussi les premières évaluations sur les consommations de matières, la qualité de l'air, les impacts sur l'artificialisation des sols et la biodiversité, tendent à montrer une moindre pression dans S1 et S2, et au contraire une pression maximale dans S4, dont les impacts environnementaux sont les plus forts au-delà des émissions de gaz à effet de serre. Tous les scénarios présentent des limites dans les conditions de réalisation pour les individus, bien que celles-ci soient contrastées selon les scénarios (*cf.* chapitre *1.2. Société, modes de vie, récits*).

8. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs

Les évolutions décrites dans les quatre scénarios sont volontairement contrastées et visent une cohérence d'ensemble dans les contextes spécifiques dans lesquels ils sont définis. **Ces évolutions ne recouvrent bien évidemment pas l'ensemble des possibles** et la réalité sera sans doute un mix entre différentes évolutions du tendanciel et des quatre scénarios avec de nombreuses autres évolutions difficiles à anticiper aujourd'hui.

Aussi, il est possible de pointer certaines **limites à l'exercice**, avec des impacts sur les quantifications et notamment les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre.

Une première limite est **l'absence formelle de crises et de ruptures modélisées**, que celles-ci soient économiques, sociales, environnementales ou systémiques. Le passé montre pourtant que les trajectoires d'évolutions de la société, et celles des transports notamment, sont marquées par des crises, qui façonnent les évolutions sur le court, le moyen et le long terme. Si ces crises ne sont pas intégrées dans les scénarios, elles peuvent cependant expliquer une part importante des évolutions prises dans les scénarios. Pour reprendre l'exemple de la crise de la Covid-19 et de son impact sur les mobilités, les scénarios reprennent certaines composantes qui ont été accélérées par la crise :

- il s'agit par exemple dans S1 et S2 de la désaffection des métropoles, de la relocalisation de l'économie, des aménagements temporaires en faveur des modes actifs ou encore de la forte réduction du trafic aérien qui modifierait ensuite les politiques publiques à l'égard de ce mode dans ces scénarios ;

- pour S3 et S4, ce sont les tendances vers un usage croissant du numérique qui sont renforcées avec le télétravail et le e-commerce. Dans S4, s'y ajoute une certaine perte de confiance dans les transports publics et le covoiturage qui renforce l'usage de la voiture individuelle.

Aussi **des évolutions fortes de certains scénarios pourraient-elles plus facilement advenir dans un contexte de crise** ou suite à une crise majeure. Par exemple S1 pourrait faire suite à des problèmes d'approvisionnements ou une flambée des prix du pétrole qui serait suffisamment longue pour justifier un contexte d'urgence dans la réorganisation de la société et des mobilités vers plus de sobriété énergétique. Cette urgence ne laisserait pas le temps nécessaire pour construire de nouvelles infrastructures de transport, comme cela peut être le cas dans S2 où les évolutions vers plus de sobriété sont davantage planifiées. Ce rôle des crises comme accélérateurs de changement ou comme une possibilité de rendre plus acceptables certaines évolutions fortes au sein de la population a également été identifié de manière qualitative par le groupe de répondants dans l'étude sur les modes de vie en lien avec les scénarios (*cf.* chapitre *1.2. Société, modes de vie, récits*).

Il en est de même pour les **évolutions ou les ruptures dues aux impacts du changement climatique**. Tout d'abord sur les infrastructures (vulnérables à la majorité des risques climatiques présentés dans le chapitre *1.3. Adaptation au changement climatique*). Ensuite, sur les conditions de déplacement et d'utilisation des moyens de transport (en particulier lors de canicules). La prise en compte des effets directs et des effets en cascade reste difficile, par manque de données consolidées et de modèles. Ainsi apparaît-il important de mieux appréhender les conséquences du changement climatique sur les comportements de déplacement à l'avenir, notamment pour les vagues de chaleur de plus en plus fréquentes et qui pourraient impacter à une large échelle les différentes formes de déplacements, leur heure et leur fréquence, ainsi que les modes privilégiés dans ces cas. Les vulnérabilités sont également fortes pour les impacts des événements extrêmes sur la mobilité des personnes et des marchandises. Si les impacts sur les infrastructures sont potentiellement plus locaux, les effets de réseaux peuvent avoir des conséquences à l'échelle régionale voire nationale si une infrastructure structurante est touchée. De même, selon le temps de remise en état, cela peut affecter la mobilité sur plusieurs semaines ou plusieurs mois et faciliter des évolutions des transports sur un temps plus long.

Il est possible ensuite d'identifier certaines **limites propres aux quantifications réalisées sur le secteur des transports**, précisées dans la description de la méthode et qui peuvent être remises en avant ici.

Concernant la mobilité voyageurs, nous n'avons pas détaillé l'analyse quantitative par territoire, âge ou motifs de déplacements, bien que des éléments soient présents sur ces thèmes dans les récits et donc indirectement dans les quantifications. De même, les données de référence pour le transport de marchandises et les projections fournies pour les quantités transportées par les autres secteurs de l'économie ne sont pas suffisamment précises pour aller loin dans l'analyse, mais permettent seulement de donner des évolutions d'ordres de grandeur. Les **aspects territoriaux** sont également importants, au-delà des formes de mobilité par grande zone géographique, pour pouvoir connecter les flux de transport avec les infrastructures de transport (leur localisation, leurs capacités et performances, leurs évolution d'ici 2050, leur impact sur l'artificialisation et la biodiversité, etc.) ou avec les déterminants spatiaux de la mobilité propres à des situations locales que les moyennes agrégées nationales ou même par structure de territoire ne permettent pas de prendre en compte.

Les analyses sur la demande et sur les motorisations sont prévues **sans modélisation technico-économique**, bien que de nombreux éléments techniques, économiques, sociologiques ou en rapport avec les tendances passées aient été pris en compte.

L'analyse sur les motorisations, notamment les gains d'efficacité énergétique à venir et la part des différentes motorisations, se base sur l'état des connaissances actuelles, dans un contexte qui évolue rapidement pour certaines technologies. C'est le cas en particulier pour les batteries (coûts, chimie utilisée, matières et contenu carbone, acteurs industriels impliqués, etc.), pour le déploiement de l'hydrogène (coûts, répartition entre mobilité et électrolyse, etc.) et ce qui concerne les fortes incertitudes existantes pour les évaluations des biomasses mobilisables (sensibles pour les biocarburants et le biogaz). Ces incertitudes et les conditions de déploiement de ces technologies pourraient être précisées dans les prochaines années. De fait, certaines projections actuelles seront probablement à revoir selon les progrès et les freins identifiés dans les différentes filières.

En troisième point, **les analyses transverses aux différents secteurs** (analyses économiques, sur les modes de vie, les impacts matières ou biodiversité, l'adaptation, etc.) présentent également des limites dans la manière dont elles ont été conduites ou dans le détail des éclairages qu'elles permettent de mettre en évidence ou non dans les scénarios.

Ces analyses sont en cours dans la mesure où elles ne peuvent être traitées qu'une fois tous les scénarios complètement finalisés et seront publiées sous forme de feuilletons (*cf.* chapitre ***1.1. Ambitions, objectifs, méthodes***). Cela implique par nature que les conditions de réalisation ou les impacts évalués ne sont pas pris en compte comme des contraintes dans les évolutions quantifiées décrites dans le présent chapitre. À ce titre, les éclairages cités d'une façon non exhaustive ci-après viendront consolider et amender utilement les représentations des scénarios, en particulier leurs conditions de faisabilité économiques, sociales et matérielles. C'est le cas des feuilletons suivants :

- Métaux de la transition écologique, avec l'évaluation des consommations matières dont les métaux dits rares ou critiques et de leur disponibilité pour les différents secteurs pour la France ;
- Modes de vie, avec l'étude de l'acceptabilité, de la désirabilité et de l'équité sociale des changements envisagés ;
- Évaluations macroéconomie et investissements et approfondissement sur les filières « construction neuve », « systèmes énergétiques », « protéines » et « logistique du dernier kilomètre », avec l'apport d'éléments sur les transformations économiques et les retombées et les bénéfices en termes d'emplois.

9. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **CGDD**, *Les comptes des transports en 2018*, 56e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation, 2019 (https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la).

[2] **CITEPA**, *Secten : le rapport de référence sur les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France*, 2020 (https://www.citepa.org/fr/secten/).

[3] **MTES**, *Stratégie Nationale Bas Carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, mars 2020, 192 pages (https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc).

[4] **Aurélien Bigo**, *Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement*, Thèse, 2020, 340 pages (http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/travail-de-these-decarboner-transports-dici-2050/).

[5] **CGDD**, *Comment les Français se déplacent-ils en 2019 ? Résultats de l'enquête mobilité des personnes*, 2020 (https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/comment-les-francais-se-deplacent-ils-en-2019-resultats-de-lenquete-mobilite-des-personnes).

[6] **DGAC**, Bulletin Statistique Trafic Aérien Commercial (https://www.ecologie.gouv.fr/statistiques-du-trafic-aerien).

[7] **CCFA**, Dossiers de presse, 2020 (https://ccfa.fr/dossiers-de-presse/).

[8] **Thierry Méot**, *L'Industrie automobile en France depuis 1950 : des mutations à la chaîne*, INSEE Références, 2009, 27 pages (https://www.insee.fr/fr/statistiques/1372354?sommaire=1372361).

[9] **ADEME**, *Car Labelling, véhicules particuliers neufs*, d'après données AAA (Association Auxiliaire de l'Automobile), 2021 (https://carlabelling.ademe.fr/).

[10] **Banque mondiale**, Catalogue de données par pays et indicateurs, 2019 (https://donnees.banquemondiale.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CN?end=2018&locations=FR&start=1984).

[11] **Chronos**, *L'Observatoire des mobilités émergentes – Vague 3. Les déterminants des comportements de mobilité des Français et des Européens*, 2018.

[12] **Actu-environnement**, *L'Organisation maritime internationale tente d'enrayer les émissions de gaz à effet de serre des navires*, 2018 (https://www.actu-environnement.com/ae/news/organisation-maritime-internationale-emissions-ges-navires-31058.php4).

[13] **CGDD**, *Mémento de statistiques des transports 2018*, 2019 (https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/memento-de-statistiques-des-transports-2018).

[14] **Briand, Y., Svensson, J., Koning, M., Combes, F., Lamy, G., Pourouchottamin, P., Cayla, J.-M., Lefevre, J.**, *Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France*, Rapport descriptif, IDDRI, 2019, 48 pages (https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/rapport/trajectoires-de-decarbonation-profonde-du-transport-de).

10. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2015	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
DEMANDE – évolution du trafic voyageurs par rapport aux Gpkm 2015 [%]	1 136,7 Gpkm	35 %	- 26 %	- 10 %	23 %	39 %
DEMANDE – évolution de la demande de mobilité par rapport aux km/an/hab. 2015 [%]	17 680 km/an/hab.	25 %	- 32 %	- 17 %	13 %	28 %
DEMANDE – évolution du trafic marchandises par rapport aux Gtkm 2015 [%]	323 Gtkm	16 %	- 45 %	- 35 %	0 %	30 %
REPORT MODAL – voyageurs – part des distances parcourues avec des modes économes en énergie (modes actifs + TC) [%]	17 %	15 %	37 %	37 %	21 %	16 %
REPORT MODAL – voyageurs – part des distances parcourues avec des modes intenses en énergie (voiture + avion) [%]	82 %	84 %	61 %	62 %	78 %	82 %
REPORT MODAL – voyageurs – part des trajets en modes actifs (marche + vélo) [%]	22 %	22 %	51 %	47 %	32 %	20 %
REPORT MODAL – voyageurs – part des trajets en transport routier individuel [%]	65 %	64 %	32 %	36 %	52 %	63 %
REPORT MODAL – voyageurs – croissance du trafic aérien par rapport aux Gpkm 2015 [%]	199,1 Gpkm	92 %	- 50 %	- 22 %	65 %	92 %
REPORT MODAL – marchandises – part des Gtkm réalisées avec des poids lourds [%]	80 %	80 %	61 %	60 %	73 %	77 %
REPORT MODAL – marchandises – part des Gtkm réalisées par ferroviaire [%]	11 %	9 %	22 %	25 %	14 %	8 %
REMPLISSAGE – nombre de voyageurs/véhicule [voy/véh]	1,58	1,51	2,03	1,88	1,78	1,62
EFFICACITÉ – voyageurs – évolution du poids des voitures neuves par rapport à 2015 [%]	1 241 kg	25 %	-27 %	-13 %	11 %	25 %
EFFICACITÉ – voyageurs – gain total d'efficacité énergétique (kWh/km) pour les voitures, y.c. électrification [%]	-	-70 %	-71 %	-73 %	-70 %	-70 %
EFFICACITÉ – marchandises – gain total d'efficacité énergétique (kWh/km) pour les poids lourds, y.c. électrification [%]	-	-15 %	-26 %	-32 %	-31 %	-43 %
DÉCARBONATION – voyageurs – part d'énergie décarbonée sur l'énergie (TWh) consommée [%]	9 %	55 %	80 %	85 %	87 %	86 %
DÉCARBONATION – voyageurs – part de l'électricité sur l'énergie (TWh) consommée [%]	2 %	40 %	49 %	50 %	45 %	45 %
DÉCARBONATION – marchandises – part de l'énergie décarbonée sur l'énergie (TWh) consommée [%]	7 %	18 %	65 %	91 %	90 %	77 %
DÉCARBONATION – marchandises – part des carburants liquides sur l'énergie (TWh) consommée [%]	99 %	86 %	65 %	38 %	22 %	15 %
DÉCARBONATION – marchandises – part du gaz sur l'énergie (TWh) consommée [%]	0,6 %	8 %	21 %	15 %	38 %	32 %
DÉCARBONATION – marchandises – part de l'électrique dans les tonnes-km du transport routier [%]	0 %	3 %	14 %	36 %	46 %	69 %

01 ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION

4. Alimentation

1. L'alimentation, un enjeu majeur du XXIe siècle
232

2. Une alimentation un peu plus végétale, plus bio, plus locale, mais aussi plus transformée
235

3. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios
237

4. Sobriété dans l'assiette et performance des filières, principaux leviers des scénarios
240

5. Comparaison des principales quantifications des scénarios
247

6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques
249

7. Limites et perspectives
253

8. Références bibliographiques
255

1. L'alimentation, un enjeu majeur du XXIe siècle

1.1. Un doublement des besoins alimentaires anticipé en 2050

L'alimentation est l'un des enjeux majeurs de notre siècle, avec le **doublement prévu des besoins alimentaires à l'horizon 2050** lié à la hausse démographique mondiale et aux évolutions des régimes alimentaires, dans un contexte de changement climatique et de réduction nécessaire de l'empreinte écologique humaine. Si l'alimentation constitue un enjeu stratégique pour les défis environnementaux, elle ne peut être dissociée des autres dimensions économiques, sociologiques et sanitaires.

Comme l'a rappelé la crise sanitaire de la Covid-19, se nourrir est une fonction vitale. Sur le plan de la santé, une alimentation saine et équilibrée contribue à la prévention de nombreuses maladies en hausse en France, telles que l'obésité, le diabète, les maladies cardiovasculaires et certains cancers, ce qui représente un enjeu de santé publique majeur. D'un point de vue social, la précarité alimentaire augmente et concernerait 10 à 15 % de la population française, comme en témoigne la hausse de la fréquentation des centres d'aide alimentaire, notamment en lien avec la crise sanitaire. Bien se nourrir nécessite un certain budget et des connaissances ! Pour autant, la répartition de la valeur sur la chaîne agroalimentaire du champ à l'assiette est inégale et de nombreux travailleurs, agriculteurs ou employés des industries agroalimentaires (IAA) sont eux-mêmes en situation de précarité. Cette chaîne agroalimentaire représente 12 % de l'emploi en France, emplois à préserver et renforcer pour conserver notre capacité à nous nourrir dans un contexte de mondialisation, de compétitivité internationale et de changement climatique. Enfin, l'alimentation est aussi en France au cœur de nos pratiques sociales, notamment festives, culturelles, de convivialité, familiales, avec une importance accordée au repas et à la gastronomie en différentes circonstances. Cette particularité est à considérer dans les réflexions autour de l'évolution des régimes alimentaires pour favoriser la transition du plus grand nombre vers des régimes plus durables.

Sur le plan environnemental, **avec un quart de l'empreinte carbone d'un Français** dont la majeure partie est émise en France, l'alimentation est un secteur incontournable pour l'atteinte de la neutralité carbone. D'autres enjeux environnementaux, notamment la préservation de la biodiversité, de la qualité de l'eau et des sols, sont aussi fortement associés à l'agriculture et donc à l'alimentation. À l'horizon 2050, les effets du changement climatique auront un impact direct sur la disponibilité, la qualité et le prix des aliments. Le changement climatique et notamment les événements extrêmes et le développement de maladies affecteront les productions agricoles et accentueront la variabilité des rendements. L'évolution des températures et de la pluviométrie impactera, de manière positive ou négative, aussi bien les rendements que la composition des aliments et leur disponibilité. Aussi, dans les prochaines décennies, les pratiques agricoles devront s'adapter en permanence à ces évolutions du climat dans chaque territoire.

25 %
C'est la part de l'alimentation dans l'empreinte carbone des Français.

Les principaux déterminants de l'impact environnemental de l'alimentation des citoyens sont :

- la quantité et la nature des aliments consommés : quantités totales ingérées, part de végétal *vs* produits animaux notamment (viande, poissons, laitages, œufs) ; type de viande et de produits animaux consommés ;
- les modes de production agricoles pour produire les aliments (production en France ou dans le monde) ; la sobriété et les gains d'efficacité sur la chaîne alimentaire (logistique, distances parcourues par les aliments…) ;
- les pertes et gaspillages sur la chaîne alimentaire, qui sont autant d'impacts de production, transformation, transport qui auraient pu être évités et *in fine* génèrent des déchets supplémentaires qui doivent être gérés ;
- le respect de la saisonnalité des productions.

Les paramètres suivants contribuent également à qualifier le système alimentaire, mais sans que l'effet direct et indirect, positif ou négatif en termes d'impact environnemental soit aisément quantifiable :

- la provenance des aliments, notamment les parts respectives de « local », de « national » et d'imports/exports ;

- le niveau de transformation et la part des aliments transformés dans l'assiette ;
- les emballages, notamment la part des boissons embouteillées dans les boissons consommées (eau minérale, boissons rafraîchissantes…) ;
- la part des différents systèmes de distribution et leur répartition territoriale : grande surface, supérette de proximité, marchés, vente à la ferme… ;
- la part de consommation à domicile *vs* hors domicile ;
- la part d'autoproduction.

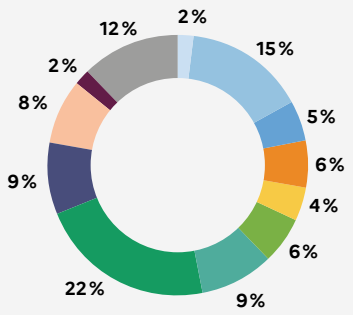
1.2. Une assiette moyenne qui cache de fortes différences

L'assiette actuelle peut être décrite sur la base des données INCA de l'ANSES [1] *(Graphique 1)*, issue de questionnaires alimentaires, riches de très nombreux détails. Les critères notamment de tranche d'âge, sexe, CSP, urbanité, géographie, saison, indication du taux de consommateurs, peuvent aider à construire des « profils ». On dispose également des données semaine/week-end et d'analyses de résultats sur le plan de la santé (apports en nutriments notamment).

Toutefois, il s'agit de données déclaratives d'ingestion pouvant présenter, sur certaines catégories, des écarts allant jusqu'à 15 %, notamment pour ce qui concerne des consommations à fort caractère de désirabilité sociale. Il est donc intéressant de croiser ces informations avec des données d'achat et des données calculées par bilan [2].

La part de produits issus de l'agriculture biologique est très bien suivie par l'Agence Bio [3] : la consommation de ces produits est en croissance forte ces dernières années. Elle représente plus de 6 % du marché alimentaire en 2019 (pour une valeur de 11 MdsEUR, dont 33 % d'importation). La part de produits relevant d'autres démarches, telles que l'agroécologie ou l'agriculture de conservation, est plus complexe, voire impossible à suivre, car elle ne relève d'aucune définition ni statistique officielle.

Graphique 1 Contenu de l'assiette moyenne française (en masse), adultes de 18 à 79 ans (n = 2121), adapté de INCA 3



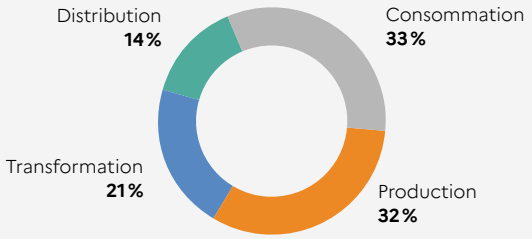
- Sucre et matières sucrantes
- Pains, viennoiseries, pâtisseries, gâteaux et biscuits sucrés
- Sandwiches, pizzas, tartes, pâtisseries et biscuits salés
- Pâtes, riz, blé et autres céréales
- Pommes de terre et autres tubercules
- Plats préparés à base de légumes, de pommes de terre, de céréales ou de légumineuses
- Soupes et bouillons
- Fruits et légumes (frais et secs)
- Yaourts, fromages et fromages blancs
- Viandes, volaille et charcuterie
- Poissons, crustacés et mollusques
- Condiments, herbes, épices, sauces, autres groupes d'aliments

1.3. Pertes et gaspillages

L'ensemble des pertes et gaspillages alimentaires [4], tous acteurs et toutes filières alimentaires confondus, représente en masse 10 millions de tonnes en France *(Graphique 2)*, soit de l'ordre d'un tiers de la production totale. Une partie (moins de 20 % de ces pertes et gaspillages) est valorisée sous forme d'alimentation animale.

Pour la phase de consommation, cela représente 30 kg par personne et par an de pertes et gaspillages au foyer (dont 7 kg de déchets alimentaires non consommés encore emballés). S'y ajoutent les pertes et gaspillages générés en restauration collective ou commerciale. En tenant compte de l'ensemble de la filière alimentaire, les pertes et gaspillages représentent 155 kg/pers./an.

Graphique 2 Répartition (en tonnage) des pertes et gaspillages alimentaires en France en 2016



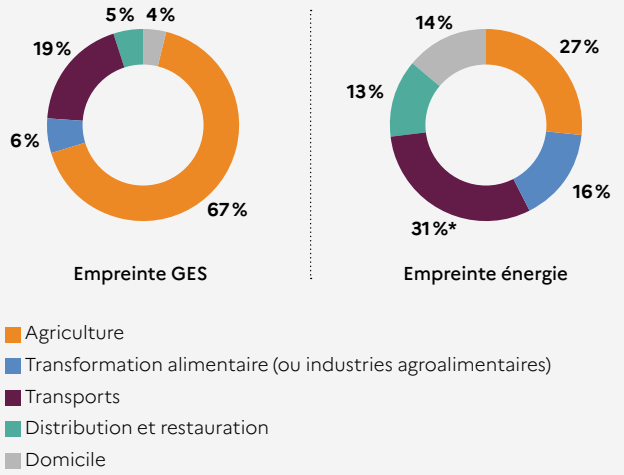
1.4. Des enjeux sur les émissions de GES, la santé et le social

L'empreinte de l'alimentation a été décrite en 2019 par les travaux CECAM [5], qui donnent un bon aperçu des principaux postes et enjeux concernant l'énergie et les GES *(Graphique 3)*. L'empreinte sol de différents régimes alimentaires a été décrite en 2020 [6] *(Graphique 4)*.

Toutefois, certains postes « secondaires » tels que la logistique du dernier kilomètre, les étapes de transformation des produits et les différents modes de distribution nécessiteraient des travaux complémentaires.

Les questions de l'eau et de la biodiversité restent primordiales, mais complexes à appréhender par les outils habituels d'analyse de cycle de vie.

Graphique 3 Empreinte GES et énergie de l'alimentation des Français par étape – de la production à la consommation

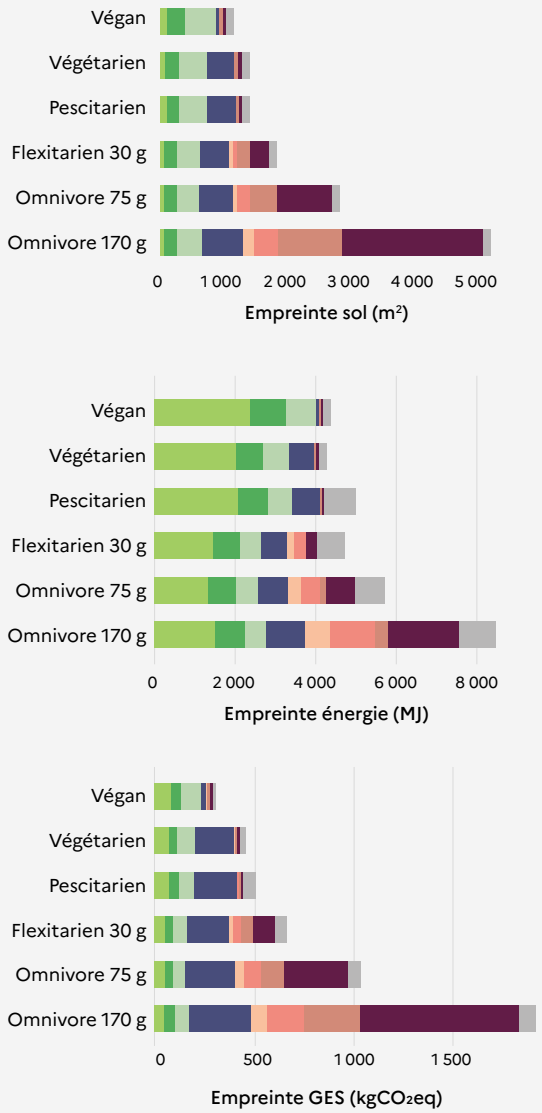


* Dont déplacement des ménages pour achat : 9 %. Source : [5].

L'empreinte carbone annuelle des pertes et gaspillages approcherait 15,5 Mt CO_2eq par an en France (soit 3 % de l'ensemble des émissions liées à l'activité nationale).

Sur le plan social et en matière de santé, on peut souligner une dégradation de l'état de santé de la population française en lien avec ses comportements alimentaires, qui se traduit notamment par un taux de 17 % de la population adulte obèse et 32 % en surpoids [7]. Ce qui fait de l'alimentation un enjeu fort de santé publique. La précarité alimentaire est également un enjeu important, qui concerne environ 12 % de la population française, une donnée en hausse depuis le début de la crise de la Covid-19.

Graphique 4 Empreinte de différents régimes alimentaires actuels des Français



Source : [6].

Le terme **flexitarien** est utilisé dans ce rapport pour représenter l'ensemble des petits consommateurs de viande (environ 30 g/jour en moyenne, soit 2 portions « standards » de viande par semaine), adoptant ce régime de façon consciente (car voulant réduire leur impact environnemental, agir en faveur du bien-être animal…) ou inconsciente (consommant naturellement peu de produits animaux par habitude, contrainte économique…).

2. Une alimentation un peu plus végétale, plus bio, plus locale, mais aussi plus transformée

La consommation alimentaire en France reste relativement stable depuis les années 1990, tant dans les variétés d'aliments consommés que dans les modes de distribution et de consommation. Les évolutions et tendances émergentes les plus récentes concernent de nombreux points.

- **Végétalisation de l'alimentation et évolution des consommations de viande** : la part de végétariens et flexitariens déclarés ou observés est en hausse, au moins sur certaines catégories de populations. Jeunes, femmes, personnes issues de milieux aisés, chacun obéit à des motivations différentes : santé, éthique, mais également de nature économique [8]. Les données [9] indiquent cependant une certaine stabilisation dans les consommations apparentes de viande (données de bilan) après une dizaine d'années de baisse: 86 kgec/hab. en 2019 contre 90 kgec/hab. en 2001, avec des fluctuations à la hausse depuis 2013. Cela serait notamment lié au développement de la consommation hors domicile et en particulier de la vente à emporter (burgers, sandwiches), alors que les achats des ménages reculent. Toutefois, la part des différentes viandes continue à évoluer fortement (hausse de la volaille au détriment des autres types de viande, stables ou en baisse). Les start-ups, Industries Agroalimentaires (IAA) et chaînes de Restauration Hors Domicile (RHD) se sont saisies du marché des substituts végétaux, en plein essor (produits très transformés en général). L'arrivée sur le marché des « nouveaux aliments » (insectes, algues, potentiellement viande *in vitro* ou autres protéines de synthèse autour desquelles la recherche et développement sont actuellement très actifs) reste encore marginale en France.

- **Boissons** : la consommation de boissons, alcoolisées ou non, est relativement stable en France depuis 20 ans. Après une baisse très importante de la consommation quotidienne d'alcool (vin de table principalement) entre 1960 et 1990, la baisse est plus faible depuis 10 ans et la France reste l'un des pays les plus consommateurs d'alcool au monde, avec de fortes disparités selon le sexe, l'âge et la région. Sur la même période, la part des eaux de table, boissons aromatisées et sodas, ainsi que jus de fruits, a fortement progressé [10].

- **Modes de production** : on observe une forte poussée du bio dans la demande alimentaire (taux de croissance à 2 chiffres depuis plusieurs années), dont on ignore si elle va atteindre un palier ou se poursuivre. Simultanément, un contexte favorable (loi EGalim [11]) accompagne des changements dans la restauration collective, poussant le bio et les labels de qualité. Cette évolution s'accompagne toutefois d'une certaine défiance vis-à-vis d'un bio de provenance étrangère ou qui « perdrait son âme » en s'intensifiant (illustré par un débat en 2019 sur la production de fruits et légumes bio sous serre chauffée). On peut noter que la croissance la plus forte des achats de produits bio est observée dans les enseignes généralistes de la grande distribution, qui représentent l'essentiel des achats alimentaires des Français.

- **Pertes et gaspillages** : la lutte contre les pertes et gaspillages est fortement portée par l'État et évolue rapidement, avec une forte mobilisation des acteurs. Un état des lieux complet a été réalisé par l'ADEME en 2016 [4], mais il est difficile de suivre et quantifier précisément les évolutions. Les récentes lois [11] instaurent de nouvelles obligations pour les acteurs, telles que la réalisation d'un diagnostic pour la restauration collective et les IAA, jusqu'ici réalisé de manière volontaire. Si des outils existent pour la restauration collective, ils restent à créer pour les

IAA. Ces dernières années, les acteurs économiques et la société civile se sont emparés de cette thématique avec un foisonnement d'outils basés sur des applications numériques. Les évolutions dans le secteur des pertes et gaspillages sont rapides et nécessitent des travaux complémentaires de cartographie pour permettre un positionnement objectif de ces offres afin d'aider les pouvoirs publics à prioriser les nouveaux besoins de développement dans les années à venir.

- **Modes de consommation** : on observe une poursuite tendancielle de la hausse de la consommation de produits transformés, en lien avec des modes de vie plus intenses et des pertes de savoir-faire culinaires. La consommation hors domicile poursuit également son développement avec un certain retard en comparaison avec d'autres pays (États-Unis, Royaume-Uni). Elle peut être associée aux modes de vie et taux d'activité (repas du midi pris hors domicile) et à la hausse du niveau de vie (restauration commerciale de « loisir »). Pour les restaurations collectives et commerciales, les années 2020-2021 ont toutefois constitué une rupture liée à la crise de la Covid-19 (fermeture de la restauration commerciale et fonctionnement partiel de la restauration collective). Cette rupture engendrera des évolutions de comportements dans la durée, en lien notamment avec le développement du télétravail.

L'alimentation de chacun est ainsi une combinaison de l'héritage culturel et familial, du mode de vie, de l'âge et de l'étape de vie associée, des goûts individuels, du budget, etc.

- **Distribution** : depuis quelques années, la grande distribution est confrontée à de nouveaux acteurs et de nouveaux modes de consommation émergents, qui suivent des tendances divergentes : développement des ventes par Internet par les acteurs historiques, mais également arrivée sur le marché de nouveaux acteurs de la vente en ligne ; en parallèle, développement de la tendance « locale », vrac, bio et retour du commerce de proximité (y compris sous enseigne de la grande distribution), qui pourrait questionner le modèle des super et hypermarchés. Une accélération de ces tendances a été observée durant la crise de la Covid-19 : forte croissance des achats alimentaires par Internet en 2020[1], moindre fréquentation de certains formats de distribution par ailleurs partiellement fermés ; recours plus fréquent aux supérettes de proximité et aux marchés de plein air (par exemple pérennisation de marchés supplémentaires dans diverses agglomérations, pour répondre à cette demande croissante).

Simultanément, on observe le développement d'applications numériques en lien avec l'alimentation, qu'il s'agisse d'identifier des producteurs locaux, un restaurant plus durable près de chez soi, ou de reconnaître les fruits et légumes de saison.

Si les tendances de consommation restent assez stables en raison d'habitudes ancrées dès l'enfance, l'alimentation peut faire l'objet de changements rapides et radicaux s'agissant d'achats de consommation quotidienne n'impliquant pas d'investissements (pour la partie ménages au moins). Des ruptures sont notamment observées à l'occasion des temps forts de la vie [12] : départ du domicile parental, vie de couple, arrivée d'un enfant, retraite… Une tendance à l'individualisation des consommations alimentaires (avec la multiplication des régimes « sans ») est également observée. On peut toutefois noter que la France conserve des spécificités alimentaires assez fortes, tant vis-à-vis d'autres pays européens que des États-Unis par exemple (temps passé à cuisiner, temps passé à table, place de la gastronomie dans le patrimoine culturel, importance du repas dans les événements forts de la vie…).

L'alimentation de chacun est ainsi une combinaison de l'héritage culturel et familial, du mode de vie, de l'âge et de l'étape de vie associée, des goûts individuels, du budget, etc.

1 https://academ.escpeurope.eu/pub/IP%202020-82-FR-Colla_CHAIR.pdf.

3. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios

Le travail de quantification de l'impact de l'alimentation et de l'agriculture a été réalisé au travers du programme SISAE [13], programme de recherche multipartenarial ayant pour objectif la simulation et l'évaluation de différents scénarios d'évolution du système alimentaire. Les données présentées sont des résultats intermédiaires, amenés à évoluer marginalement dans la mesure où le projet SISAE est en cours à la date de la rédaction de ce rapport, avec une fin prévue pour le dernier trimestre 2021. Certaines hypothèses ont été adaptées dans ce programme pour tenir compte des contraintes de la modélisation mais les principaux ordres de grandeurs sont respectés. Pour le détail des hypothèses utilisées dans la modélisation, il conviendra de se référer au détail du rapport de ce programme.

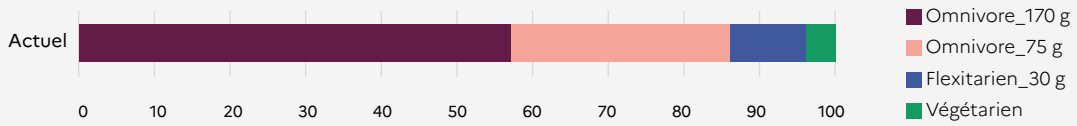
On peut noter que certaines hypothèses, quoique quantifiées, n'ont pas ou peu d'influence sur les résultats en termes d'impact environnemental et servent davantage au « narratif ». D'autres ne peuvent être modélisées, faute de données pertinentes à ce stade, comme les viandes de synthèses par exemple. **Toutefois, le premier facteur d'impact de l'alimentation réside dans les régimes alimentaires : modes de production, quantité et nature des aliments consommés.**

Pour modéliser les différents scénarios, 4 groupes de consommateurs ont été extraits du projet BioNutriNet [14] conduit dans la cohorte NutriNet-Santé, caractérisés notamment selon leur niveau de consommation de viande :

- omnivore_170 g : régime alimentaire contenant 170 grammes de viande par jour et par personne (incluant tous les produits carnés, y compris sous forme de produits transformés), ce qui correspond à une à deux portions de viande par jour ;
- omnivore_75 g : régime alimentaire contenant 75 grammes de viande par jour et par personne, soit une portion quasi quotidienne de viande, incluant éventuellement un ou deux jours « sans » ;
- flexitarien_30 g : régime alimentaire contenant 30 grammes de viande par jour et par personne, soit 2 portions « classiques » de viande environ par semaine ou de plus petites portions réparties sur la semaine ;
- végétarien : majoritairement des régimes végétariens (sans viande, mais contenant des produits laitiers et des œufs), mais incluant aussi les populations pescitariennes (incluant des produits de la mer) et végan, qui demeurent peu nombreuses et pour lesquelles les données disponibles sont trop restreintes pour pouvoir les distinguer en des catégories indépendantes.

On parvient ainsi à reconstituer dans les grandes lignes la consommation moyenne des Français en 2015 (données INCA3, considérées comme représentatives de la consommation actuelle), en particulier la consommation de viande qui est la plus structurante, en attribuant chacun de ces régimes « réels » à une partie de la population française *(Graphique 5)*. Cette approche permet de mieux rendre compte de la diversité des comportements alimentaires qu'un simple régime « moyen ». À noter toutefois qu'il est impossible de représenter strictement le régime actuel avec seulement 4 régimes différents.

Graphique 5 Part de la population française en 2020 associée à chacun des 4 groupes de consommateurs proposés



Des contraintes ont ensuite été définies pour faire évoluer ces différents régimes d'ici 2050 vers des assiettes « optimisées », intégrant les évolutions envisagées dans les scénarios. Ces évolutions comprennent notamment :

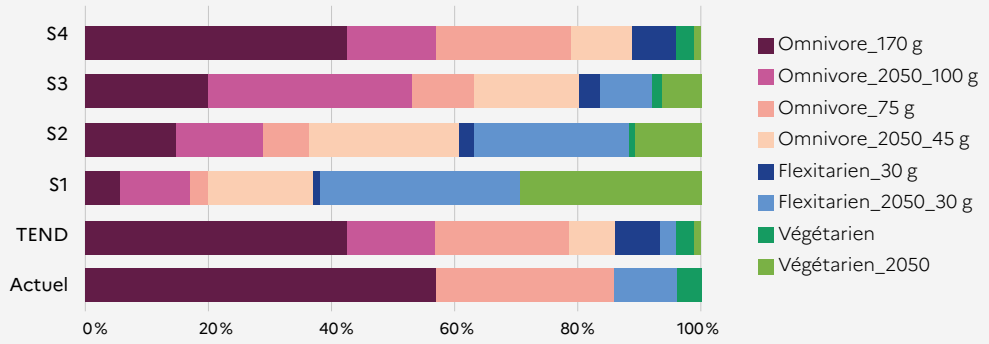
- **une meilleure prise en compte des enjeux nutritionnels**, avec un ajustement au besoin pour la plupart des nutriments ainsi que pour les apports caloriques ;
- **une évolution des consommations de viande** (baisse des quantités pour les plus gros consommateurs et évolution des types de viandes consommées) et des produits laitiers (en cohérence avec la baisse de la consommation de viande).

Nous obtenons ainsi 4 nouvelles assiettes optimisées par modélisation, nommées « 2050 », présentant les caractéristiques suivantes :

- **omnivore_2050_100 g** : issu du régime omnivore_170 g, ce régime comporte une réduction des surconsommations des viandes bovines, ovines et porcines et une légère augmentation des volailles. Les produits laitiers sont divisés par deux et la réduction des boissons chaudes « exotiques » (café, thé, chocolat) est importante également. La place relative des produits végétaux augmente dans le régime, en particulier la consommation de légumineuses qui est multipliée par 3 et atteint quasiment 50 g/jour ;
- **omnivore_2050_45 g** : des modifications similaires sont appliquées au régime omnivore_75 g ;
- **flexitarien_2050_30 g** : la quantité de viande consommée est stable mais les types de viandes évoluent (moins de porc/charcuterie en particulier). Les autres évolutions sont similaires. Les substituts de produits laitiers apparaissent dans le régime ;
- **végétarien_2050** : l'optimisation nutritionnelle conduit principalement à une augmentation de la quantité de légumineuses consommées. Comme pour les autres régimes « optimisés », la consommation de produits exotiques (café, thé, chocolat et fruits) est contrainte et la consommation de produits laitiers réduite.

Dans chaque scénario, on produit ensuite un régime alimentaire « moyen » qui résulte de la combinaison de l'ensemble de ces différentes assiettes, adoptées par des proportions variables de la population. Des hypothèses ont été faites sur la part de chaque groupe de mangeurs susceptible de ne pas évoluer, ou bien d'évoluer vers l'assiette miroir optimisée ou vers une autre assiette (correspondant à un autre groupe de mangeurs) *(Graphique 6)*.

Graphique 6 Proportion de chaque groupe de mangeurs, au sein de la population actuelle, dans les 4 scénarios ainsi que dans le tendanciel



Cela a pour conséquence, par exemple dans S3, qu'environ 35 % de la population fortement consommatrice de viande conserve le régime omnivore_170 g ; tandis que le reste de cette population fait évoluer son régime vers une assiette optimisée, contenant plus ou moins de viande (58 % évoluent vers omnivore_2050_100 g et 7 % évoluent vers le régime omnivore_2050_45 g).

La population pescitarienne (consommant des protéines animales uniquement issues de produits de la mer ou d'œufs et de produits laitiers) reste marginale dans l'ensemble des scénarios car son développement, qui aurait été possible pour des enjeux nutritionnels notamment, est contrarié par la pression qu'il exercerait sur les ressources maritimes et par la présence importante de contaminants dans ce régime. Pour cette raison, nous l'avons intégrée à la population « végétarienne » sans en faire un groupe spécifique (dans le projet SISAE les 3 groupes végétarien, pescitarien et végan sont distincts). Le groupe « végétarien » présenté ici est une assiette pondérée intégrant 50 % de végétariens, 25 % de pescitariens et 25 % de végans.

Concernant la part de produits importés dans les assiettes, le modèle MOSUT a été utilisé pour faire le lien entre production agricole du territoire et demande alimentaire : la chaîne de modélisation est résumée dans le chapitre *2.2.1. Production agricole* ou en ligne [15]. Les hypothèses d'imports/exports ont été introduites dans ce modèle, en lien avec les questions de relocalisation. Régimes et productions agricoles ont donc été modélisés précisément, dans le cadre du programme SISAE.

Les autres paramètres relatifs aux consommations alimentaires n'ont pas été modélisés de manière spécifique :

- soit ils sont liés à d'autres fonctions, par exemple le bâtiment (usages énergétiques associés à la cuisson, la conservation des aliments, la transformation par les industries agroalimentaires…) ou le transport des denrées alimentaires : dans ce cas, ils ont été intégrés plus globalement aux modélisations propres à ces systèmes ou seront affinés dans le projet SISAE ;
- soit leur influence en termes d'impact GES est faible : ils sont donc intégrés dans le narratif mais ne font pas l'objet de modélisation ;
- soit nous ne disposons pas de données permettant d'évaluer finement leur impact.

4. Sobriété dans l'assiette et performance des filières, principaux leviers des scénarios

Nos habitudes de (sur-)consommation ont un impact majeur sur l'environnement mais aussi sur notre santé. Les experts internationaux déplorent et alertent sur l'épuisement des sols et des ressources, la déforestation, la surexploitation de la mer et la saturation des milieux en pollutions diverses. Dans le même temps, les citoyens sont de plus en plus sensibles et attentifs au contenu de leur assiette, à la provenance des aliments, à la qualité des produits et aux modes de production utilisés. Mais leurs choix sont aussi balancés par l'enveloppe budgétaire qu'ils peuvent ou souhaitent allouer à leur alimentation, par l'offre disponible et son accessibilité, ainsi que par l'information mise à disposition.

La première option de différenciation forte entre les scénarios réside dans une évolution contrastée des régimes alimentaires : l'assiette des Français sera-t-elle plus saine ? plus durable ? plus ou moins diversifiée ?

- Les scénarios 1 et 2 misent sur une grande sobriété dans l'assiette par le biais d'une transition alimentaire vers des régimes plus sains se rapprochant des recommandations nutritionnelles, en quantité comme en qualité et plus sobres en ressources avec une réduction drastique des consommations de produits animaux, notamment carnés. L'empreinte (GES, sol) de l'alimentation des Français est significativement réduite, contribuant ainsi à l'effort global. Tout en conservant une certaine diversité dans l'assiette, cela signifie toutefois la fin du « tout, tout de suite » *via* une reconnexion entre le potentiel de production des territoires et le contenu de l'assiette. Celle-ci, beaucoup plus végétale, varie significativement au fil des saisons mais peut sembler plus monotone à une saison donnée. On y voit aussi se réduire la consommation de produits exotiques tels que le café, le thé, le cacao ou certains fruits non productibles sous les latitudes métropolitaines et sources d'impacts élevés pour leur production [16] (consommation de sol, d'eau…) ou leur transport (émissions de GES).

- Les scénarios 3 et 4 misent sur les performances des filières et la capacité d'autres secteurs à stocker du carbone ou produire en limitant l'impact sur l'environnement, pour modifier les régimes alimentaires de manière moins significative en moyenne. La baisse de la consommation de viande est plus limitée que dans S1 et S2 (mais plus importante que dans le scénario tendanciel). Cette évolution intègre une hausse des préoccupations de santé et d'environnement pour une partie de la population seulement. Le régime du reste de la population obéit à d'autres paramètres : plaisir immédiat, praticité, gain de temps et absence de contrainte, budget. On intègre toutefois la poursuite tendancielle du transfert des viandes rouges, bovine principalement, vers des viandes blanches, moins coûteuses et (un peu) moins sujettes aux controverses sociétales telles que le bien-être animal.

La seconde orientation forte concerne la qualité environnementale des aliments consommés : en premier lieu leurs modes de production. Cette orientation est fortement liée aux évolutions de la production agricole du territoire, décrites dans le chapitre *2.2.1. Production agricole*. Mais en partie seulement, en fonction de la part des importations.

Ainsi, dans S1 et S2, les productions à très bas niveau d'intrants (agriculture biologique ou très proche, agroécologie…) deviennent les modes de production dominants sur le territoire, en accord avec l'aspiration du consommateur à plus de naturalité et de sobriété et à une assiette plus saine. On retrouve donc majoritairement ces productions dans les assiettes, dans la mesure où cette évolution est associée à une forte relocalisation de la consommation et un recours très limité aux importations, couplés à des leviers politiques forts permettant de réduire la concurrence des produits importés. Dans ces scénarios, la souveraineté alimentaire devient un enjeu stratégique. La priorité est donnée aux produits nationaux, voire locaux, grâce à une réorganisation des productions sur le territoire national en rupture avec la logique de spécialisation des quarante dernières années.

Dans S3, ces productions biologiques destinées en priorité à la consommation intérieure cohabitent avec une part de production plus intensive. Les échanges internationaux de productions alimentaires restent massifs comme c'est le cas actuellement, car l'agrandissement de la taille des exploitations se poursuit, dans une logique de production duale à destination du marché national et international au gré des opportunités économiques. Le scénario 4 est assez similaire sur ce plan, mais il intègre en outre l'arrivée significative sur le marché des « nouvelles protéines » : « produits similicarnés » à base de végé-

taux, de protéines d'insectes ou de viande cellulaire, cette dernière n'étant pas envisagée dans les autres scénarios en raison des freins culturels, technologiques et sanitaires à son développement.

Dans cet exercice prospectif, en accord avec les objectifs nationaux de réduction fixés par la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire [11] et la prise de conscience des enjeux par les différents acteurs, les pertes et gaspillages (sur l'ensemble de la chaîne du champ à l'assiette) sont réduits de moitié à l'horizon 2050 pour tous les scénarios. Il semble difficile aujourd'hui de dépasser cet objectif. Toutefois, selon les scénarios, la réduction se met en place de manière plus ou moins forte sur les différents maillons de la chaîne alimentaire. Elle se produit *via* l'activation de leviers très contrastés, allant d'une sobriété volontariste sur S1 et S2 à des outils connectés performants offrant une traçabilité de la fourche à la fourchette et une gestion instantanée des surplus et risques de pertes sur S3 et S4.

Sur le plan de la restauration hors foyer, les différents scénarios se distinguent également. Les modélisations de ces tendances sont intégrées dans le chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*. Si la progression de la restauration hors foyer reste commune aux scénarios, les différences entre scénarios se traduisent davantage dans la restauration collective. Celle-ci renforce son rôle social et optimise l'usage de ses locaux avec des ouvertures à différents publics selon les moments de la semaine ou de l'année dans S1 et S2. Dans S3 et S4, la restauration hors foyer est davantage portée par les loisirs et le tourisme (dont une part consommée par les touristes étrangers visitant le territoire).

La numérisation de la société est présente dans tous les scénarios, avec une gradation de ses usages. Dans S1, elle se limite à un rôle fonctionnel (utilitaire), avec un focus dans les usages permettant de réels gains environnementaux (par exemple, réservations de repas permettant de réduire le gaspillage). Dans S4 (et dans une moindre mesure S3), les consommateurs, comme les entreprises et collectivités, s'appuient en permanence sur des outils d'assistance et d'aide à la décision numérique. L'intelligence artificielle prend le dessus sur les initiatives individuelles pour permettre une alimentation plus durable.

4.1. Scénario tendanciel : surconsommation alimentaire et progression continue des besoins

Les années 1990 marquent la fin de la première transition alimentaire (et de la hausse de la consommation de viande). Depuis, la composition de l'assiette, en France comme dans les autres pays développés, est relativement stable. Les principales évolutions de consommations pressenties sont à relier à des évolutions des modes de vie : évolution des temps et lieux de consommation (baisse de la durée consacrée aux repas et à leur préparation, essor du télétravail, par exemple) ; évolution des pratiques d'achats (achats en ligne, développement des circuits de proximité, recherche de « garanties » alimentaires *via* le développement du bio et de produits « sans ») ; individualisation de la société (et des pratiques alimentaires).

Dans le **scénario tendanciel**, la surconsommation alimentaire se maintient et génère une hausse de l'indice de masse corporelle de 5 % à l'horizon 2050. Cette hausse, combinée à l'évolution de la pyramide des âges en 2050, génère une augmentation des besoins de l'ensemble de la population en protéines et énergie d'environ 20 %.

En termes de régime alimentaire, ce scénario est caractérisé par une poursuite de la baisse tendancielle actuellement observée de la consommation de viande avec une substitution accrue de la viande bovine et porcine par de la volaille. En proportion dans l'assiette, la consommation de sucre diminue, tandis que celle de fruits, légumes et légumineuses augmente, ces évolutions s'accordant mieux avec les recommandations nutritionnelles. Les consommations d'alcool et de produits laitiers sont en légère baisse.

Le numérique poursuit son développement, ce qui génère des effets contrastés :

- essor des commandes en ligne (et des livraisons à domicile), aussi bien de denrées alimentaires (30 % de part de marché) que de repas ;
- essor du télétravail pour une part de la population, avec un retour des déjeuners à domicile (préparés ou livrés) ;
- le temps comme les dépenses consacrés aux loisirs notamment numériques ont tendance à impacter ceux destinés à l'alimentation.

Dans le même temps, la restauration hors foyer poursuit son évolution à la hausse (pour atteindre ¼ des repas) sous des formes différentes : livraison de repas, augmentation de la consommation « loisir » et du snacking, découlant d'une certaine déstructuration et individualisation des repas.

Concernant les aliments transformés et ultratransformés, une accentuation des tendances actuelles est envisagée, avec une part des aliments transformés dans la consommation totale passant de 40 % aujourd'hui à 60 % en 2050 (dont la moitié correspondrait à des aliments ultratransformés).

Dans ce scénario, l'autoproduction-autoconsommation au sein des ménages reste stable.

À l'exception de certaines productions très saisonnières, elle représente actuellement une très faible part des volumes consommés même si la majorité de la population est concernée par de l'autoproduction-autoconsommation à des niveaux très variables. Selon INCA3, ¾ des personnes consomment au moins une fois par mois des aliments issus de leur propre production, de celle d'un proche ou de la cueillette, chasse et pêche, dont ¾ parmi elles au moins une fois par semaine.

Si les messages autour du « bien manger » (fruits et légumes de saison, produits bio, circuits de proximité…) poursuivent leur développement, leurs effets sur la consommation des ménages restent assez limités et ne bouleversent pas les modes et habitudes de consommation, en raison des changements de comportements nécessaires et du manque d'accompagnement. À l'exception du bio, qui se stabilise à 20 % de part de marché, dont une part significative est importée en raison de tarifs plus concurrentiels à l'import.

Les circuits de proximité se développent, principalement par le biais de la grande distribution qui s'est emparée du sujet. Celle-ci reste largement dominante sur le marché, avec toutefois une évolution des catégories de surface de vente et en particulier, un mix entre hypers/supers et supérettes de proximité.

À l'échelle nationale, la part des importations dans l'alimentation poursuit sa hausse (en particulier pour les fruits, légumes et produits laitiers), en lien avec les spécialisations de territoire et la recherche des matières premières les plus économiques. La multiplication des événements climatiques extrêmes (crues, inondations, sécheresses, tempêtes…) pourrait générer des irrégularités fortes dans les rendements des productions, nécessitant de recourir encore davantage aux importations pour substituer les productions manquantes.

Le gaspillage alimentaire, sous l'effet des politiques publiques, se réduirait de 30 % sans atteindre les objectifs de 50 % attendus.

4.2. Scénario 1: profonde transformation des habitudes alimentaires sur fond de prise de conscience

Dans ce scénario, une évolution profonde des pratiques alimentaires est à l'œuvre en 2050, poussée par :

- une prise de conscience forte de l'ensemble de la population (prise en compte des impacts environnementaux et sanitaires liés à l'alimentation et amélioration de la connaissance de la chaîne agroalimentaire) qui se traduit par des effets majeurs et pérennes dans les comportements d'achat et de consommation ;

- une évolution contrainte de l'offre alimentaire, accompagnée par les politiques publiques et les contraintes économiques en lien avec la raréfaction des ressources et un objectif de résilience alimentaire. Ces politiques, menées aux échelles locales, nationales et internationales, visent une autonomie maximale à l'échelle nationale. Autrement dit, une faible dépendance aux importations (de produits alimentaires mais également de l'ensemble des intrants nécessaires à la production nationale : matériel, engrais et produits phytosanitaires, énergie…), la relocalisation des productions et la transformation des systèmes productifs pour faire mieux correspondre offre et demande et aller vers des systèmes diversifiés plus durables et résilients.

Une réduction des pertes et gaspillages marquée notamment sur l'amont (chez les producteurs) et l'aval (au niveau des consommateurs, au foyer et hors domicile) est rendue possible par un nouveau rapport aux denrées alimentaires, et plus globalement à l'alimentation : retour d'une certaine « valeur » donnée à l'alimentation, temps et part de budget consacrés à cette fonction, etc. La moindre place des acteurs intermédiaires et du marketing contribue également à cette évolution. Dans ce scénario, une part impor-

tante de la population s'oriente vers des régimes alimentaires fortement végétalisés (⅓ de la population ne consomme pas du tout de viande et ⅓ opte pour un régime flexitarien correspondant à 2 portions hebdomadaires de viande). Ces régimes sont également caractérisés par un meilleur profil nutritionnel (moins de sucre, d'alcool, de boissons sucrées), dans une recherche d'alimentation saine et sobre dont l'impact sur la santé et l'environnement est meilleur. Cela se traduit également par une extensification des systèmes de production agricoles, en particulier pour les productions animales restantes, en lien avec les questions de bien-être animal. Suite à la prise de conscience des enjeux de préservation de la biodiversité pour la santé humaine et la planète, la population rejette en majorité l'utilisation des produits phytosanitaires. Ce qui permet de convertir plus des ⅔ du territoire vers des modes de production à très bas niveaux d'intrants de synthèse (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*).

Motivés par une communication ciblée et une montée en compétence (publicité pour des produits durables, information aux heures de forte audience, sensibilisation dans les écoles, formation des professionnels…), les Français mettent en avant dans leurs actes d'achat une alimentation locale, bio, de saison et de proximité avec les producteurs. Les citoyens redonnent de la « valeur » à leur alimentation à laquelle ils attachent une importance croissante. Sa part dans le budget des ménages augmente et des mesures sont mises en place pour garantir l'accès à tous à une alimentation saine, équilibrée et durable, y compris les populations précaires. Le temps consacré à la fonction alimentaire (jardinage, achats, transformation, consommation) se stabilise, voire réaugmente avec le développement de l'autoproduction et d'activités de loisir autour de la production alimentaire. La relocalisation à l'échelle nationale est recherchée sans pour autant être atteinte à 100 %, préservant certains circuits d'imports/exports utiles en réponse aux aléas climatiques. Cet objectif stimule le développement des circuits de proximité et le développement d'emplois locaux y compris en zone rurale, mais la spécialisation de certains territoires implique toutefois des flux de marchandises à l'échelle nationale de produits moins standardisés (limitant les pertes), peu ou pas transformés. Les pratiques culinaires au foyer et la restauration hors foyer s'adaptent et intègrent la lutte contre le gaspillage, qui s'en trouve fortement réduit. Les collectivités redéveloppent des cuisines centrales en régie, avec une vocation sociale renforcée, à la fois en termes de tarif et de public (ouverture des cantines scolaires aux habitants, notamment séniors, télétravailleurs et populations précaires). Ces lieux deviennent de nouveaux espaces d'apprentissage, de solidarité et de convivialité.

Dans S1, les Français mettent en avant dans leurs actes d'achat une alimentation locale, bio, de saison et de proximité avec les producteurs.

Ce scénario voit également le développement significatif d'une agriculture urbaine sociale et solidaire et du jardinage (collectif et individuel), accompagné par l'ouverture de tiers lieux incluant des cuisines et de petites unités de transformation accessibles à tous.

Dans le même temps, on observe une réduction du surpoids et de l'obésité ainsi qu'une amélioration de l'état de santé de la population, en particulier du fait d'une diminution forte de la surconsommation et notamment de la surconsommation protéique globale, associée à une division par 3 et 2 de la consommation de viande et de produits laitiers et une réduction de la consommation de poisson. Cette consommation de viande devient occasionnelle, mais orientée vers des produits de qualité, issus du territoire national, respectant l'environnement et autant que faire se peut le bien-être animal : élevages à l'herbe, parcours, exploitations autonomes. Les fruits et légumes importés sont en majorité substitués par des produits issus de bassins locaux (jus de pomme, poire ou raisin au lieu du jus d'orange par exemple) et la quantité de légumineuses dans l'assiette augmente très fortement. De même, les produits tropicaux sont consommés avec modération (café, cacao, fruits…). Les productions sous serre chauffée sont fortement réduites. Les aliments privilégiés sont frais et de saison, ou sous forme de conserves et de surgelés (produits bruts). La consommation de produits très transformés chute et les gammes se réduisent drastiquement au profit d'aliments de base plus sains, mais également moins chers car vendus bruts ou peu transformés.

Les citoyens redonnent de la valeur à leur alimentation.

4.3. Scénario 2 : évolution des pratiques soutenue par des politiques publiques ambitieuses

Le scénario 2 est assez proche du précédent en termes de demande alimentaire, mais l'alimentation des Français est davantage suivie et accompagnée par des politiques publiques ambitieuses. Les évolutions envisagées sont accompagnées par des politiques publiques incitatives (aides, formation…) et répressives (taxes…), en fonction de l'impact environnemental et des enjeux nutritionnels des produits alimentaires. S'y ajoutent un travail renforcé d'éducation à l'alimentation durable mis en œuvre dès le plus jeune âge (programmes scolaires, publicité et programmes audiovisuels pour des produits/régimes sains et durables…) et l'intégration systématique des enjeux de durabilité de l'alimentation et préconisations associées dans toutes les formations professionnelles en lien direct (cuisiniers, diététiciens, agroalimentaire…) et indirect (éducateurs sportifs, enseignants, méde-

cins, secteur social…) avec l'alimentation. Campagnes de communication et affichage environnemental et nutritionnel accompagnent cette montée en compétence de fond de la population.

Les principaux déterminants de la consommation alimentaire sont la santé, l'environnement et l'origine des produits. Dans cette approche globale, les régimes alimentaires ont considérablement évolué par rapport à aujourd'hui. Ils s'approchent, pour une part importante de la population, des recommandations nutritionnelles de la FAO et sont également porteurs d'une demande d'extensification des systèmes de production agricoles, en bio (ou assimilés). Les régimes sont dominés par une diminution importante (mais moindre que dans S1) de la surconsommation protéique globale et de la consommation de produits animaux (viande et poissons). Celle-ci est divisée par deux, au profit de protéines végétales peu transformées qui représentent alors près de la moitié des apports protéiques de l'assiette moyenne.

Tout comme dans le scénario précédent, **la consommation de viande devient occasionnelle**, orientée vers des produits respectant davantage l'environnement et le bien-être animal. L'assiette accueille proportionnellement davantage de céréales, huiles et légumineuses par rapport à l'assiette actuelle. La consommation de légumes et de fruits est moins contrainte que dans S1 (maintien de produits importés exotiques ou de produits issus de serres chauffées par exemple). Les produits locaux, bio, de saison et de proximité (vente directe…) sont soutenus par les pouvoirs publics, notamment par la mise en place de systèmes de quotas/taxation à l'import en saison de production et de taxation différenciée des produits les plus sains/durables (bio, fruits et légumes frais). En conséquence, la part des importations dans l'alimentation diminue significativement, comme présenté dans le chapitre *2.2.1. Production agricole*.

Dans S2, les principaux déterminants de la consommation alimentaire sont la santé, l'environnement et l'origine des produits.

Les citoyens redonnent de la « valeur » à leur alimentation en y attachant une importance forte et **les usages numériques s'intensifient pour accompagner les consommateurs dans leurs choix** grâce à des applications permettant de suivre l'origine, la nature des produits, leur saisonnalité par exemple et/ou plus globalement leur « score » environnemental et nutritionnel, en lien avec la généralisation de l'affichage. La part de l'alimentation dans le budget des ménages augmente légèrement, mais l'évolution vers un régime moins carné, les politiques de soutien aux productions durables et aux ménages modestes aident à compenser la hausse des coûts de production et par conséquent celle des prix de vente.

Les circuits de proximité deviennent la principale voie de commercialisation de produits moins standardisés, peu ou pas transformés, grâce à un soutien fort au développement de projets alimentaires territoriaux cohérents et adaptés à chaque territoire. Ceux-ci structurent réellement la dynamique alimentaire et favorisent la résilience à l'échelle des territoires (incluant le retour de l'emploi et la dynamisation des territoires ruraux). La diversification des productions agricoles aux échelles territoriales contribue également à une meilleure résilience face aux aléas climatiques.

Les pratiques culinaires au foyer et la restauration hors foyer s'adaptent et intègrent la lutte contre le gaspillage. Les collectivités redéveloppent des cuisines centrales en régie. Ce scénario voit également **le développement d'une agriculture urbaine à vocation sociale et solidaire et de jardinage** (collectif et individuel) afin de maintenir des espaces verts destinés à un usage récréatif, au stockage de carbone, à un rôle de réservoir de biodiversité.

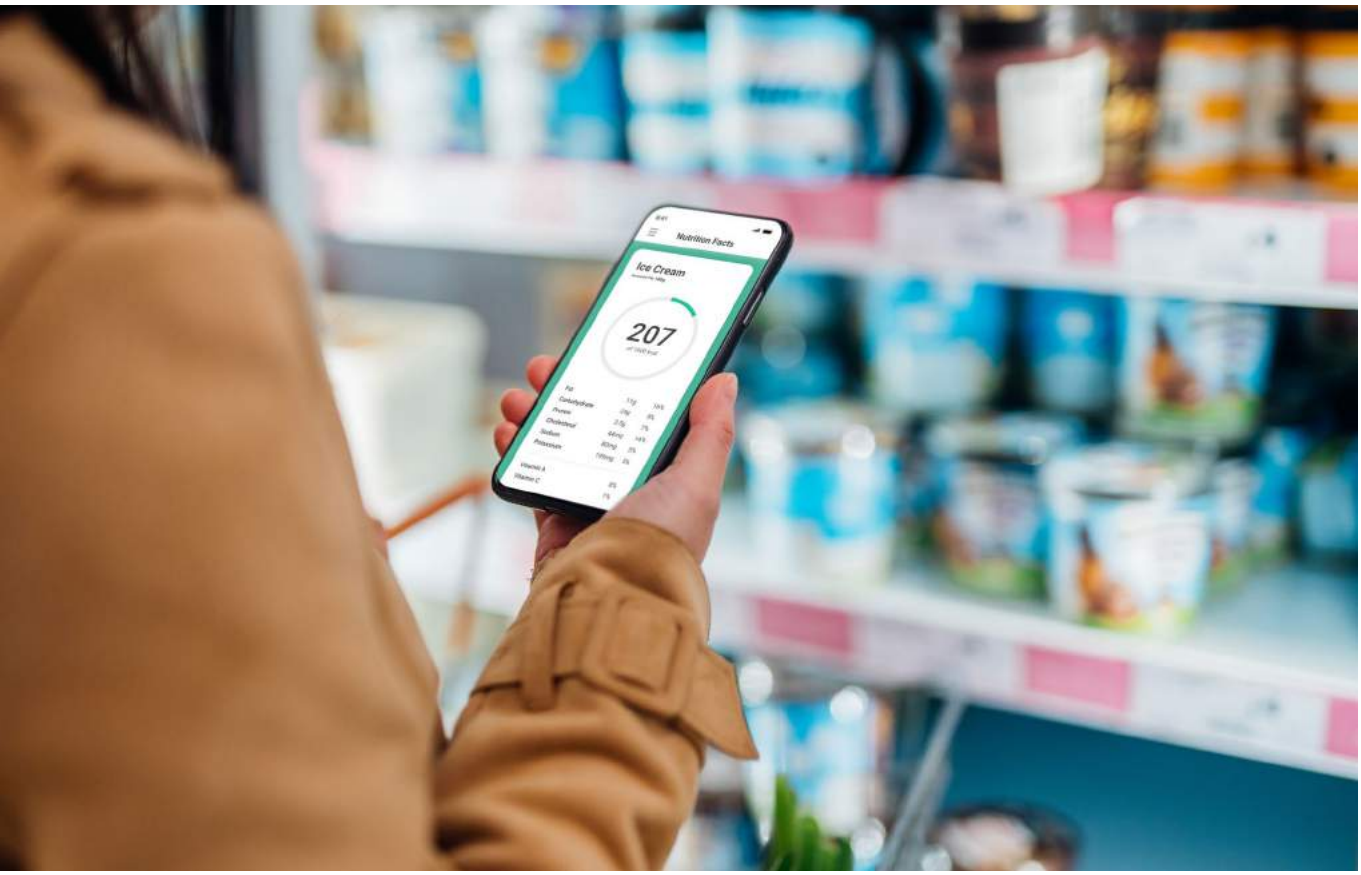
L'atteinte des objectifs de réduction des pertes et gaspillages alimentaires s'opère majoritairement grâce aux actions sur l'amont (chez les producteurs) et l'aval (*via* les consommateurs), avec une contribution progressive des acteurs intermédiaires de la transformation et de la distribution.

4.4. Scénario 3 : des pratiques qui concilient gastronomie et préoccupations de santé/ environnement

En 2050, dans S3, les choix alimentaires des Français intègrent les questions d'environnement et de santé, sans restreindre de façon prononcée les niveaux de consommation dans une société qui consacre largement le plaisir individuel. L'indice de masse corporelle diminue toutefois, signe d'une alimentation plus équilibrée sous l'effet dual de la sensibilité accrue d'une partie de la population et d'accompagnements personnalisés à l'alimentation par le biais d'applications multiples. Le contenu énergétique de l'alimentation (calories consommées) diminue de 20 % tout comme la quantité de protéines ingérée. La part des protéines végétales passe à près de 50 % (⅓ actuellement). Les niveaux de consommation individuels de légumes, céréales, œufs et huile restent proches des niveaux actuels alors que les consommations de fruits, lait, sucre, boissons chaudes ou alcoolisées diminuent. Des fruits exotiques sont toujours importés (bananes, ananas, oranges, avocats…) en réponse à une demande toujours existante pour ces produits. La consommation quotidienne de légumineuses passe de 18 à 49 grammes. La tendance d'évolution à la baisse de la consommation de viande se poursuit (avec une baisse d'environ un tiers, un peu plus pour la viande bovine et porcine, un peu moins pour la volaille). Elle est notamment compensée par une part plus importantes de protéines végétales dans l'alimentation, *via* le développement des légumineuses. La consommation de poisson diminue légèrement.

Avec le développement d'outils numériques d'aide à l'achat et à la consommation (applications mobiles, affichage environnemental…) mais aussi la moindre importance accordée au temps alimentaire face au développement des loisirs, les consommateurs se tournent globalement vers plus de restauration hors foyer, d'aliments transformés prêts à l'emploi et de nouveaux aliments (protéines alternatives…). Mais sous les efforts des industriels combinés à la pression sociale exercée par le nutriscore et l'affichage d'un score environnemental obligatoires sur les produits alimentaires et dans la restauration, les aliments transformés et l'offre de restauration sont globalement plus sains et plus durables que les produits disponibles sur le marché en 2020.

Ces comportements de consommation favorisent une optimisation technique et technologique des



systèmes de production agricole. L'offre nationale de produits bio ne se développant pas suffisamment pour faire face à la demande intérieure, l'importation de produits biologiques augmente pour répondre à la demande des Français de produits plus respectueux de l'environnement et de leur santé (mais attachant plus d'importance au prix qu'à la provenance) tandis que, de façon générale, les importations de denrées alimentaires non bio diminuent. Les exportations sont stables et concentrées sur des produits de qualité (parfois même le bio, pour des raisons économiques) (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*).

La réduction du gaspillage atteint 50 % par rapport aux pertes actuelles. Les efforts entrepris se traduisent à toutes les phases (production, récolte, transformation et consommation), fortement soutenus par des développements technologiques et numériques adéquats.

4.5. Scénario 4 : stabilité de la demande avec intégration de critères de santé

Dans ce scénario, en 2050, les choix alimentaires des Français intègrent peu de contraintes, si ce n'est les aspects santé qui sont davantage pris en compte dans les produits transformés et ultratransformés et la consommation hors domicile, *via* des incitations de nature libérale (tarif des mutuelles santé indexé sur le régime alimentaire par exemple) et les aides numériques.

Dans cette approche, la demande alimentaire change peu : l'indice de masse corporelle continue à augmenter, les surconsommations en protéines et en calories diminuent faiblement ainsi que la part de protéines animales. Néanmoins, les régimes alimentaires ont évolué par rapport à 2015. Ils intègrent plus fortement de nouveaux aliments (pavés végétaux imitant la viande, protéines d'insectes et, à l'approche de 2050, premières viandes de synthèse), en réponse à des attentes contrastées et parfois opposées de la société : bien-être animal *vs* consommation de viande ; recherche de praticité/rapidité au meilleur coût, faible impact environnemental à moindre coût… La consommation de poisson se maintient grâce à l'aquaculture, dont une partie est nourrie de protéines alternatives (insectes…). La consommation de viandes blanches augmente au détriment des viandes rouges, sans éliminer celles-ci qui restent tirées par la consommation hors foyer et la demande de produits laitiers. Toutefois, la réorientation des priorités budgétaires vers les loisirs et le numérique a pour conséquence la poursuite de l'intensification et la spécialisation des productions, favorable à une baisse des coûts. En dehors des zones urbanisées, les zones de production agricole intensives alternent avec des espaces « naturels » dédiés aux loisirs et à une forme de préservation de la biodiversité.

Les liens entre production agricole et alimentation s'en retrouvent déconnectés, de même qu'entre producteur et consommateur et par voie de conséquence, la répartition de la valeur le long de la chaîne de production du champ à l'assiette. La méconnaissance/le désintérêt des consommateurs vis-à-vis de la production alimentaire se traduit par une consommation qui tient peu compte des saisons mais plutôt des envies.

De plus, la demande alimentaire se tourne très fortement vers les aliments préparés et transformés et la consommation hors domicile, permettant une individualisation des consommations au regard des attentes de chacun y compris au sein des ménages. Les aides à la cuisine (robots ménagers multifonctions) permettent à une partie de la population de s'adonner à une cuisine « maison » peu consommatrice de temps.

Les liens entre production agricole et alimentation s'en retrouvent déconnectés, de même qu'entre producteur et consommateur.

Le numérique a pris une place très importante dans les modes d'achats et de consommation (applications numériques d'aide au choix pour les achats/la préparation/la consommation hors domicile, vente à distance, outils connectés…). Les systèmes de production agricoles qui en découlent intègrent de manière poussée les avancées technologiques et l'automatisation, sans forcément parer aux impacts environnementaux et intègrent aussi le développement des OGM. Pour répondre à la demande croissante de la population, le pays se tourne vers les importations lorsque cela s'avère nécessaire, notamment pour les produits tropicaux ou issus de l'agriculture biologique, qui s'est insuffisamment développée sur le territoire national. Afin de répondre à une demande de localisme d'une partie de la population, l'agriculture urbaine s'est développée en favorisant les formes les plus technologiques (serres urbaines, conteneurs, aéroponie…) et associées à des systèmes énergétiques vertueux (énergie de récupération…).

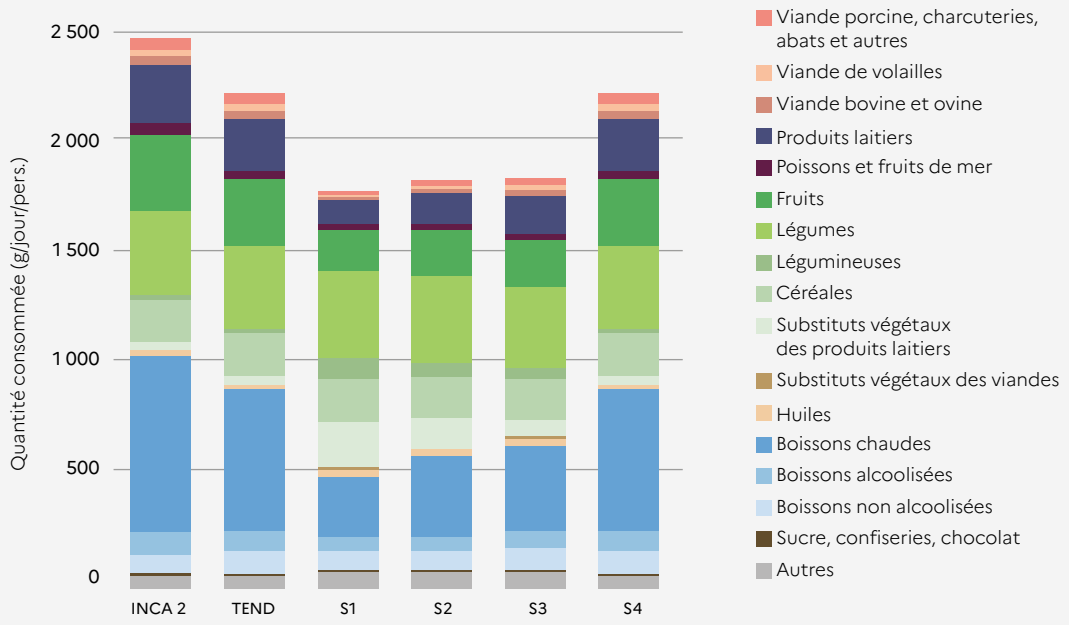
Le traçage numérique de l'ensemble des produits, les appareils connectés et les applications d'aide au choix/à la réalisation (alertes automatiques, optimisations des stocks, de la logistique, plateformes d'échange…) permettent une certaine optimisation des impacts environnementaux et de santé, mais surtout une réduction importante du gaspillage alimentaire, équivalente aux autres scénarios.

5. Comparaison des principales quantifications des scénarios

L'évolution des régimes alimentaires se traduit de façon contrastée entre les différents scénarios, en particulier concernant la part carnée de l'alimentation, qui évolue au profit d'une consommation de légumineuses et d'un rééquilibrage nutritionnel global de l'assiette *(Graphique 7)*.

L'assiette INCA2 est basée sur les données de l'étude INCA2 (2006-2007) et ne reflète pas complètement les habitudes de consommation actuelles. Les données de l'étude INCA3 présentées en ***Graphique 1*** offrent une vision plus à jour des habitudes de consommation de la population française (2014-2015), mais à la date de rédaction de ce rapport elles ne peuvent pas être présentées sur le même graphique que le ***Graphique 7*** du fait d'une segmentation différente des types d'aliments.

Graphique 7 *Composition de l'assiette du régime moyen français dans chaque scénario en 2050, représentée en quantités consommées par jour et par personne, boissons incluses, sauf eau (INCA2 représente le régime moyen actuel)*



Sources : données intermédiaires du projet SISAE.

À l'échelle du consommateur, une évaluation des impacts des régimes « moyens » des différents scénarios (eux-mêmes issus d'une combinaison des régimes différenciés présentés en début du chapitre) met en évidence des contributions très différentes de l'alimentation selon les scénarios à la réduction des émissions de GES.

De façon approximative en attendant les résultats issus du programme SISAE, **en prenant en compte uniquement l'impact de la réduction de la consommation de viande sur les émissions agricoles** (poste majoritaire dans l'assiette actuelle), nos scénarios pourraient se traduire par une réduction d'empreinte carbone individuelle de l'ordre de 600 $kgCO_2eq$/an par rapport aux émissions actuelles dans S1, 60 $kgCO_2eq$/an dans S4 *(Tableau 1)*. Les émissions actuelles de l'alimentation d'un Français étant estimées à 2,5 tCO_2eq/an, dont les ⅔ pour la phase de production agricole. Les ordres de grandeur sont similaires pour l'empreinte sol, qui représente la surface mobilisée par les cultures permettant la production de l'alimentation d'un Français, en France ou à l'étranger, et l'empreinte énergie, qui traduit la quantité d'énergie nécessaire à la production alimentaire d'un Français pour la fabrication des intrants, les cultures, l'élevage, etc. Ainsi, S1 et S2 permettent une division respectivement par 1,7 et 1,4 des terres occupées et par 1,4 et 1,3 de l'énergie consommée, contre seulement - 6 % (empreinte sol) et - 4 % (empreinte énergie) dans S4 dont l'évolution est similaire au tendanciel.

Ces évolutions d'empreinte seront à affiner dans les travaux en cours (SISAE) afin de prendre en compte l'impact de l'évolution de l'ensemble du régime alimentaire ainsi que sur l'ensemble de la chaîne et non seulement sur la production agricole.

Les gains en termes de contribution à l'atteinte de la neutralité carbone sur le territoire national sont évalués :

- sur la partie amont (production) dans le chapitre *2.2.1. Production agricole* ;
- sur la partie aval (transformation, distribution et consommation) dans les chapitres *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*, *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises* et *2.2.3. Production industrielle*.

D'une manière générale, on peut conclure que les changements de l'assiette jouent un rôle majeur dans l'empreinte individuelle et les efforts qui ne seront pas faits *via* une assiette plus sobre seront à reporter sur d'autres secteurs. Notamment, dans le domaine de la lutte contre le changement climatique, l'alimentation y « pesant » actuellement pour ¼ de nos émissions de GES, l'évolution de l'assiette telle qu'envisagée dans S1, S2 et dans une moindre mesure S3 est indispensable pour atteindre les objectifs de réduction des émissions. Dans le scénario 4, les émissions de l'alimentation seule seront à compenser par des mécanismes de stockage par exemple.

Tableau 1 Évolution des empreintes énergie, GES et sol de la phase de production agricole par rapport à l'empreinte actuelle, uniquement estimée à partir de la consommation de produits carnés

	Actuel (INCA 2) [6]	TEND	S1	S2	S3	S4
Consommation de viande (g/jour)	123	- 10 %	- 70 %	- 50 %	- 30 %	- 10 %
Empreinte énergie de la production agricole (MJ/an)	6 200	- 4 %	- 29 %	- 21 %	- 13 %	- 4 %
Empreinte GES de la production agricole ($kgCO_2eq$/an)	1 540	- 6 %	- 45 %	- 32 %	- 19 %	- 6 %
Empreinte sol de la production agricole (m^2)	4 300	- 6 %	- 40 %	- 29 %	- 17 %	- 6 %

6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques

De ces quatre scénarios prospectifs alimentaires, **plusieurs leviers clés sont à mobiliser** pour permettre de réduire de façon suffisante l'impact environnemental de nos consommations alimentaires (empreinte sol, énergie et GES, mais également biodiversité, eau…):

- **végétaliser progressivement l'assiette des Français**, en revoyant l'équilibre entre protéines animales et végétales de nos régimes alimentaires, tout en conservant un équilibre nutritionnel et la diversité des apports alimentaires. Ainsi, sur la base des travaux menés en 2020 [6], chaque baisse de 10 g/jour de viande permet de réduire d'environ 210 MJ/an, 80 $kgCO_2$/an et 200 m^2/an les empreintes énergie, GES et sol du régime moyen français, ce qui revient à introduire un repas végétarien par semaine en remplacement d'un repas de viande. Dans les scénarios les plus ambitieux dans le changement d'assiette, la baisse de la consommation de viande bovine s'accompagne d'une baisse de la consommation de produits laitiers, pour des raisons de cohérence des systèmes productifs ;

- **diminuer l'apport calorique global** (à âge et sexe donnés), en cohérence avec les politiques préventives de santé publique visant à améliorer l'état de santé de la population et en particulier à réduire l'incidence de l'obésité et du surpoids, ainsi que des maladies associées à une alimentation déséquilibrée. Cette action est à mener en particulier auprès des publics précaires ;

- **faire évoluer les modes de production**, notamment vers des productions moins émissives et moins impactantes (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*), orientées vers la qualité plutôt que vers les volumes ;

- **réduire les pertes et gaspillages**, sur l'ensemble de la chaîne du champ à l'assiette et en activant l'ensemble des leviers disponibles. En particulier, améliorer la connaissance de la chaîne de production et redonner de la valeur à l'alimentation constituent des leviers importants pour changer les comportements.

Néanmoins, les leviers de réduction des émissions de GES diffèrent en fonction du type de production :

- **pour les produits animaux**, les émissions de GES sont principalement liées à la production et au changement d'usage des sols mais relativement moins aux transports. Il importe de considérer en premier lieu les leviers permettant de faire évoluer les modes de production en complément d'une réduction des consommations carnées et plus globalement des consommations de produits animaux ;

- **pour les produits végétaux**, l'empreinte carbone est principalement impactée par les lieux de production, la demande de transport et le mode de transport, relativement plus que par les émissions liées à la production. Une relocalisation de ces productions les rapprochant des consommateurs est donc essentielle. Si le passage à des modèles à bas niveaux d'intrants modifie peu les émissions de gaz à effet de serre (à régime alimentaire identique), il permet des économies d'énergie significatives ;

- **la question complexe de l'occupation des terres.** La production alimentaire est un domaine complexe et d'autres impacts que les émissions de GES doivent être pris en compte, nécessitant parfois des compromis. Ainsi, la généralisation des pratiques plus agroécologiques dans des systèmes à bas niveaux d'intrants de synthèse va générer une extensification, donc une augmentation de l'empreinte sol, laquelle peut être compensée par la réduction de la consommation de produits animaux. Cette question renvoie également :
  - à la « qualité » des terres concernées, qui est variable selon les lieux (par exemple plaine ou montagne) ;
  - aux impacts de changement d'usages des terres (comme par exemple la destruction de forêts amazoniennes pour y produire des aliments, à destination du bétail principalement) dont les effets sur les stocks de carbone et la biodiversité sont considérables.

D'une manière plus générale, l'analyse des flux de denrées agricoles et alimentaires met en évidence **la nécessité d'une relocalisation d'une partie des productions**, avec plusieurs objectifs :

- **améliorer la résilience des systèmes alimentaires**, aujourd'hui fortement dépendants des transports (et donc du pétrole);

- **rapprocher les producteurs des consommateurs**, afin de redonner du sens à l'alimentation et de la « valeur » aux produits et d'améliorer la connaissance des consommateurs vis-à-vis de la production alimentaire ;

- **ancrer des emplois dans les territoires**, emplois agricoles mais également au sein des outils de transformation et dans la chaîne de distribution de l'alimentation.

Pour les produits végétaux mais également certains produits animaux, il est indispensable de donner au consommateur les outils de connaissance de la saisonnalité des produits, pour limiter les demandes « hors saison » sources de fortes pressions sur les ressources (énergie) et les écosystèmes (aquatiques par exemple pour les poissons). Les leviers politiques n'ont pas été approfondis dans cette section, mais il semble primordial, pour permettre une transition efficace vers des modes de consommation plus durables, d'activer des leviers au niveau des productions agricoles et agroalimentaires autant que des règles de commerce international (concurrence déloyale, homogénéisation des cahiers des charges…).

> Il faut considérer que le secteur alimentaire est directement lié à d'autres secteurs, qui devront évoluer en cohérence pour réaliser une transition réussie.

L'éducation et la sensibilisation (publicité, information objective sur les produits, évolution des programmes d'enseignement…) jouent également un rôle majeur. L'émergence d'organisations innovantes sur les territoires comme les **projets alimentaires territoriaux (PAT)**, permettant une prise en compte transversale et adaptée des enjeux par la mobilisation de l'ensemble des acteurs de la chaîne alimentaire du territoire, contribue aux évolutions du système alimentaire.

L'évolution du prix de l'alimentation selon les scénarios n'a pas été étudiée et nécessiterait des travaux complémentaires pour affiner ensuite les leviers à développer, en particulier pour garantir aux populations précaires l'accès à une alimentation saine et durable.

La consommation hors domicile, qui a une place importante dans tous les scénarios, peut être un outil dans la mise en œuvre des différents leviers, à différents niveaux :

- rôle d'exemplarité et de sensibilisation, voire d'éducation (dans le cas de la restauration collective) ou de coconstruction d'un imaginaire durable (dans le cas de la restauration commerciale), au travers d'une offre écoresponsable : produits biologiques, alternatives végétales ;
- soutien à la structuration de filières vertueuses, au travers des volumes qu'elles représentent ;
- rôle social de la restauration collective : accès à tous à une alimentation saine et durable.

Le rôle du numérique dans la transition alimentaire émerge à peine et il est encore difficile d'estimer son impact à l'horizon 2050. Néanmoins, les nombreux usages apparus depuis quelques années (affichage environnemental, nutriscore, anti-gaspillage…) tout comme les développements à venir, telles que les technologies Blockchain [17] pour améliorer la traçabilité des aliments, laissent penser que ce levier sera fondamental dans l'évolution de notre relation de confiance à l'alimentation et au secteur agroalimentaire.

Cette information à destination du consommateur pourra par ailleurs être encore améliorée dans les prochaines années avec les travaux actuellement menés sur **l'affichage environnemental des produits**. Par exemple, la sortie de la base de données Agribalyse V3 en 2020, qui contient 2 500 aliments, permet de nouvelles mises à jour des données d'empreintes de différentes régimes alimentaires, qui pourront à terme compléter ces informations.

La question des emballages alimentaires n'a pas été traitée spécifiquement car, bien qu'elle constitue un sujet environnemental en tant que tel (80 % des emballages ménagers sont des emballages alimentaires), son impact environnemental ne représente qu'une faible part de l'impact global du produit. Dans ce contexte, s'il est essentiel de réduire les volumes d'emballages et d'optimiser les matériaux utilisés, les emballages gardent un rôle important dans la préservation des qualités des produits (et donc *in fine* dans la lutte contre le gaspillage alimentaire).

TRANSVERSALITÉ

Il faut considérer que le secteur alimentaire est directement lié à d'autres secteurs, qui devront évoluer en cohérence pour réaliser une transition réussie :

- **santé** : les évolutions alimentaires auront un impact direct sur l'état de santé de la population et donc le besoin et les coûts d'accès aux soins (maladies cardiovasculaires, obésité, cancer…), mais également sur la résilience de la population en cas de crise sanitaire (perturbateurs endocriniens, pesticides, substances contenues dans les plastiques, sensibilités aux maladies…) ;
- **agriculture et industries agroalimentaires** : le lien entre production et consommation peut être plus ou moins marqué (de l'autosuffisance à la déconnexion complète) sans que ces éléments n'aient été complètement chiffrés. Et ce, quand bien même ils auraient un impact sur les consommations énergétiques des filières agroalimentaires et des acteurs de la conservation/distribution, mais aussi sur l'organisation des filières. À noter que notre système agricole, donc alimentaire, actuel est fortement dépendant des ressources fossiles et de leur coût ;

- **transports** : le système alimentaire actuel est directement lié à notre capacité à transporter les aliments à bas coût, au niveau collectif (transport de marchandises) et individuel (achats) ;

- **autres secteurs de la consommation** : la transition écologique initiée par un consommateur s'exprime souvent de façon plus globale, au-delà de ses actes d'achat ;

- **organisation urbaine et bâtiment** : on observe une structuration du fait alimentaire dans l'espace, à l'échelle de la ville (lieux d'approvisionnement, de consommation) et du domicile (place attribuée à la préparation – y compris stockage – et consommation des repas). Le volet équipements pèse également (techniques économes de type cuisson basse température, stratégies de conservation, etc.), ces éléments ayant des conséquences directes en termes de consommation énergétique et d'émissions de GES.

TEMPORALITÉ DES DÉCISIONS STRUCTURANTES

Les leviers identifiés nécessitent une évolution simultanée de l'offre et de la demande alimentaire qui doit être coordonnée.

Dans un premier temps (dès 2021-2022) et quel que soit le scénario, il est essentiel de **consolider les dynamiques en cours** :

- **mettre en œuvre pleinement les lois** EGalim, AGEC et Climat et Résilience en restauration collective notamment : introduction de 20 % minimum de produits biologiques, diversification protéique et menu végétarien, information des consommateurs, suppression des plastiques, lutte contre le gaspillage. **Un accompagnement semble indispensable** (ressources, accompagnement humain, formation) pour en garantir l'application sur l'ensemble du territoire et consolider leurs effets dans le temps ;

- **accompagner les changements de comportement** par un travail massif de **formation des professionnels** ayant un lien direct ou indirect avec le sujet alimentaire, aux enjeux de durabilité (environnement, santé, relocalisation notamment). **Sensibiliser le grand public** et renforcer/réintroduire la formation aux enjeux de l'alimentation durable *via* l'Éducation nationale. Le développement d'actions éducatives « de terrain » (visites, cours de cuisine) est également nécessaire ;

- **poursuivre l'évaluation des impacts environnementaux de l'alimentation et investiguer** notamment les enjeux spécifiques aux nouvelles technologies (gains environnementaux *vs* impacts) et aux nouveaux produits (viande végétale et de synthèse, protéines alternatives, fermes verticales), en particulier dans l'optique des scénarios 3 et 4 qui reposent en grande partie sur ces technologies.

Simultanément, il est indispensable de soutenir le développement d'une offre plus durable et relocalisée, à la fois pour la production et la transformation. En effet, la hausse de la demande en produits issus de l'agriculture biologique et en légumineuses, comme la réduction de la consommation de viande en privilégiant des produits issus de filières durables,

doivent se traduire par un retour à une diversification des productions sur le territoire national. Le consommateur ne devrait pas avoir à choisir entre « bio » et « local », mais devrait plutôt pouvoir trouver du bio local ! Le soutien aux productions plus agroécologiques est donc indispensable pour parvenir à des niveaux de productions élevés (devenant les modes de production majoritaires dans S1 et S2).

Dans un second temps, entre 2030 et 2035, les accompagnements structurants (formation, développement des filières et des outils de transformations) auront été mis en place et **il s'agira d'accélérer la transition agricole et alimentaire**, en particulier dans S1 et S2, pour que les nouvelles pratiques (agriculture à faibles niveaux d'intrants, consommation territorialisée, flexitarisme…) passent d'une part émergente (20-30 %) à une part dominante (supérieure à 50 %, voire 70 %).

Dans S3 et plus particulièrement S4, la période 2035-2050 verra la banalisation de l'intelligence artificielle au service de la production comme de la consommation. On peut penser que le marché régentera en grande partie son fonctionnement. Toutefois, **le rôle de l'État restera essentiel pour garantir l'équité des citoyens et la protection des libertés individuelles**, mais également pour favoriser le développement des technologies les plus vertueuses et aussi interdire celles présentant des impacts environnementaux trop élevés, quel que soit leur niveau de rentabilité éventuel.

Des politiques publiques ambitieuses sont indispensables pour soutenir une transition alimentaire à la hauteur des objectifs environnementaux. Celles-ci doivent de plus intervenir en cohérence avec les politiques agricoles (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*). Le *Tableau 2* présente un récapitulatif des principales mesures concourant à la mise en œuvre des scénarios prospectifs.

Tableau 2 Récapitulation des politiques publiques les plus structurantes par scénario

	S1	S2	S3	S4
ÉDUCATION/SENSIBILISATION/INFORMATION				
Renforcer l'éducation à l'alimentation durable sur l'ensemble du cursus scolaire				
Formation aux enjeux environnementaux de l'alimentation intégrée dans l'ensemble des formations initiales et continues en lien direct (cuisiniers, nutritionnistes…) ou indirect avec l'alimentation (médecins, coachs sportifs, social…)				
Sensibiliser l'ensemble de la population aux impacts environnementaux (dont la déforestation importée) et aux pistes d'actions pour une alimentation durable (nudge, marketing…)				
Réforme de la publicité sur les produits alimentaires (et cadrage pour les produits les plus impactants)				
Déployer l'affichage environnemental et/ou une information environnementale renforcée				
Soutenir le développement d'outils de mesure individuels des impacts de l'alimentation				
Instaurer un label officiel pour les restaurants commerciaux les plus engagés				
SOUTIEN À L'ÉVOLUTION DE L'OFFRE (en complément des mesures du chapitre *2.2.1. Production agricole*)				
À l'échelle nationale				
Mettre en place une TVA différenciée pour les produits à bas intrants (bio)				
Mettre en place des dispositifs incitatifs/dissuasifs pour les produits les plus vertueux/impactants, en France et/ou à l'import (taxe, bonus/malus, quotas…)				
Mettre en place des chèques alimentaires réservés à l'achat de produits durables (bio, locaux et sains) pour les populations précaires (voir revenu alimentaire de base pour tous)				
À l'échelle des territoires				
Organiser une gouvernance agricole, alimentaire et foncière cohérente à l'échelle de chaque territoire (généralisation des PAT, mise en cohérence avec les stratégies foncières et politiques agricoles – PLU/SCoT…)				
Soutien pérenne à l'animation et aux actions des PAT les plus ambitieux et cohérents				
Soutien aux études d'opportunités/de faisabilité pour l'émergence/la diffusion de circuits courts de proximité optimisés et durables				
Exemplarité et rôle moteur de la restauration collective				
Accompagner la mise en œuvre des loi EGalim/AGEC/Climat pour la restauration collective publique et rehausser progressivement les objectifs				
Généraliser les mesures applicables à la restauration collective publique, à l'ensemble de la restauration collective privée				

7. Limites et perspectives

7.1. Des consommateurs aux profils variés qui restent maîtres du jeu

Sauf dans l'éventualité d'une volonté politique forte et imposée, les propositions d'évolution des régimes alimentaires émises dans ces scénarios sont directement soumises à l'appropriation par le consommateur, qui demeure maître de ses choix, en fonction de son budget, de ses sensibilités (environnement, santé, plaisir, culture, habitudes…) mais aussi de l'offre de produits répondant à ses attentes.

Une récente étude menée par l'IFOP pour FranceAgriMer [18] a notamment montré que les profils consommateurs sont très variés (âge, CSP, motivations...). L'attachement culturel et gustatif aux produits carnés est l'un des facteurs principaux motivant les consommateurs français de viande à ne pas faire évoluer leur régime de façon drastique. À l'opposé, les consommateurs ayant évolué ou souhaitant évoluer vers des régimes contenant très peu, voire aucun produit animal voient leur processus de transition alimentaire freiné par des verrous sociaux (défiance, incompréhension de leur entourage, peur d'une alimentation non équilibrée…) et organisationnels (difficultés d'accès à des menus adaptés hors domicile, accès à la connaissance…).

Il est ainsi difficile de développer des projections d'évolution des différents régimes au sein de la population tant ces phénomènes sont actuellement mouvants, en particulier au sein des nouvelles générations. L'accompagnement par des politiques publiques de sensibilisation, d'éducation et de formation est indispensable au regard de l'ampleur du mouvement attendu, sauf si celui-ci est poussé par des crises sanitaires majeures.

D'autre part, une vigilance particulière devrait être portée sur les possibles effets rebonds de certaines évolutions/mesures envisagées :

- la tendance à réduire sa consommation de produits carnés à domicile, annihilée par une augmentation de la part consommée hors domicile (souvent moins bien estimée) [19] ;
- un retour important à la cuisine d'aliments bruts, qui pourrait générer l'achat et l'usage de multiples petits appareils électroménagers consommateurs de ressources et d'énergie ;
- les messages obligatoires contre les repas trop gras, trop sucrés, trop salés et autres bandeaux de prévention (à terme sur l'environnement) qui peuvent avoir un effet contre-productif déculpabilisant inconscient (le message n'est plus lu et le produit fini par être perçu comme sain/durable) [20] ;
- le développement des achats à distance dont le rapport gains/impacts environnementaux est mal connu (pour les produits alimentaires et pour la livraison de repas à domicile) ;
- l'essor du numérique et ses impacts, par rapport à ses bénéfices.

Enfin, certains secteurs innovants, en particulier au sein des filières protéines, pourraient bousculer le contenu de nos assiettes ou au contraire rester marginaux. En effet, l'ouverture récente à la consommation humaine des insectes [21] pourra générer à l'horizon 2050 des évolutions de l'offre en aliments transformés. Les cultures cellulaires et viandes de synthèse n'en sont encore qu'à leurs balbutiements, mais les investissements R&D par certains adeptes des solutions technologiques sont colossaux. Si les verrous techniques et sociaux étaient levés, ces productions pourraient trouver un marché en 2050, les impacts environnementaux d'une production à l'échelle industrielle demeurant pourtant encore inconnus…

7.2. L'évolution des assiettes soumise au changement climatique et autres chocs exogènes

L'évolution des régimes alimentaires pourrait être impactée par l'intensification des phénomènes extrêmes liés au changement climatique, mais aussi à d'autres chocs exogènes comme par exemple des scandales sanitaires, ce qui pourrait amener à une prise de conscience et à une mobilisation plus rapides de la population. Qu'il s'agisse de ruptures d'approvisionnement temporaires ou saisonnières, ou de manière plus durable d'évolution des productions alimentaires en lien avec les changements climatiques, l'impact sur le contenu et le coût de l'assiette pourra être majeur.

Des crises telles que la pandémie liée à la Covid-19 ont profondément bouleversé notre lien à l'alimentation lors du premier confinement. La pérennité de ces évolutions est encore incertaine mais cet épisode est un bon exemple de la capacité de nos systèmes à évoluer rapidement sous la contrainte.

7.3. Un lien à creuser avec le budget des ménages

Plusieurs éléments n'ont pas été explicitement traités dans cette section et mériteraient un travail d'approfondissement dans les années à venir :

- les conséquences sur les différentes filières de production sont extrêmement complexes et toutes n'ont pas pu être creusées. Une publication est prévue en 2022 sur l'impact des scénarios au sein des filières protéines par le groupement [Futuribles/Ceresco], mais les autres filières devraient être également traitées afin d'aboutir à une vision cohérente globale ;
- les enjeux spécifiques liés au contexte insulaire des DOM-TOM : une étude est en cours en 2021 ;
- la lutte contre la précarité alimentaire, notamment dans le contexte post-crise de la Covid-19 ;
- les leviers règlementaires à considérer pour :
  - soutenir des productions diversifiées, séduisantes, locales, durables et de saison ;
  - lutter contre la concurrence déloyale (écarts de cahiers des charges entre pays, écarts de coûts de production…) ;
  - lutter contre la publicité faisant la promotion de produits ayant un impact environnemental et/ou sanitaire négatif.

Enfin, l'impact de ces évolutions de régimes sur le budget des ménages n'a pas été estimé alors que cet élément est déterminant pour une grande partie de la population lors de l'acte d'achat. La traduction de ces propositions prospectives (concernant l'alimentation mais aussi, plus largement, la répartition globale du budget des Français) serait une suite intéressante à réaliser, afin par exemple de favoriser l'acceptation de certaines des propositions envisagées.

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail** (Anses), INCA3, données 2014-2015 (https://www.anses.fr/fr/content/inca-3-evolution-des-habitudes-et-modes-de-consommation-de-nouveaux-enjeux-en-mati%C3%A8re-de).

[2] **FranceAgriMer**, Données production – export + import (https://www.franceagrimer.fr/Eclairer/Outils/VISIO-Donnees-en-ligne).

[3] **Agence Bio**, *Le marché alimentaire Bio en 2019*, rapport complet, 2020, 86 pages et www.agencebio.org.

[4] **ADEME**, *Pertes et gaspillages alimentaires : l'état des lieux et leur gestion par étapes de la chaîne alimentaire*, 2016.

[5] **Barbier Carine *et al.*, ADEME**, *L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France*, Club Ingénierie Prospective Énergie et Environnement, Paris, IDDRI, 2019, 24 pages.

[6] **Barbier Carine *et al.*, ADEME**, *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation. Partie 1 : empreintes de régimes alimentaires selon les parts de protéines animales et végétales*, 2020, 34 pages.

[7] **Santé Publique France**, Données 2015, source ESTEBAN.

[8] **IFOP pour FranceAgriMer**, *Étude végétariens et flexitariens en France en 2020*, 2021.

[9] **Agreste**, *La consommation de viande en France en 2019 – Synthèse conjoncturelle*, 2020, 359 pages.

[10] **INSEE**, *Les dépenses des ménages en boissons depuis 1960*, INSEE Première 1794, février 2020.

[11] **Loi EGalim** en octobre 2018 et **loi anti-gaspillage pour une économie circulaire** en janvier 2020.

[12] **ADEME**, *Les moments de vie comme opportunités pour encourager les pratiques responsables*, 2021 (https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/4622-les-evenements-de-vie-comme-opportunites-pour-encourager-des-pratiques-ecoresponsables.html).

[13] **SISAE** : Simulation prospective du Système Alimentaire et de son Impact, contrat 2003C0029, en cours à la date de rédaction de ce rapport.

[14] **NutriNet-Santé** (https://etude-nutrinet-sante.fr/).

[15] **Solagro**, *MOSUT, outil de modélisation systémique sur l'utilisation des terres* (https://solagro.org/travaux-et-productions/outils/mosut-outil-de-modelisation-systemique-sur-l-utilisation-des-terres).

[16] **Barbier Carine *et al.*, ADEME**, *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation. Partie 2 : empreintes des importations agricoles et alimentaires françaises*, 2020, 36 pages.

[17] **Agreste**, *Les perspectives offertes par la blockchain en agriculture et agroalimentaire*, 2019 (https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Ana140/Analyse_1401907.pdf).

[18] **IFOP pour FranceAgriMer**, *Étude végétariens et flexitariens en France en 2020*, 2021.

[19] **Pleinchamp**, *Mange-t-on vraiment de moins en moins de viande en France ?* (https://www.pleinchamp.com/actualite/actualites-generales~mange-t-on-vraiment-de-moins-en-moins-de-viande-en-france).

[20] **Werle Carolina O.C. et Cuny Caroline**, *The boomerang effect of mandatory sanitary messages to prevent obesity*, Marketing Letters 23, 883-891, 2012 (https://link.springer.com/article/10.1007/s11002-012-9195-0).

[21] **Reusir.fr**, *Insectes : feu vert à la consommation humaine de vers de farine en Europe.*

02

ÉVOLUTION DU SYSTÈME PRODUCTIF

257 Production agricole

292 Production forestière

316 Production industrielle

02 ÉVOLUTION DU SYSTÈME PRODUCTIF

1. Production agricole

1. L'agriculture : à la croisée de multiples enjeux
258

2. Rétrospective des tendances
262

3. Description de l'état actuel
265

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios
266

5. Stratégies pour le secteur selon chaque scénario
268

6. Comparaison des principales quantifications des scénarios
275

7. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques
282

8. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives de travail
285

9. Références bibliographiques
290

10. Annexe : évolution des principales variables du secteur
291

1. L'agriculture : à la croisée de multiples enjeux

1.1. Les fonctions attendues de l'agriculture et les enjeux pour la transition

Le secteur agricole est aujourd'hui à la croisée de multiples enjeux alimentaires, énergétiques, environnementaux, économiques et sociaux. Il s'agit de répondre en qualité et en quantité aux besoins alimentaires de la population française et des productions dédiées à l'export, mais également aux besoins non alimentaires en augmentation, comme par exemple les bioénergies et les produits biosourcés. En parallèle, ces systèmes productifs agricoles doivent aussi répondre à des attentes de nombreux services environnementaux, comme par exemple la préservation de la biodiversité, la préservation de la ressource en eau et des sols, ou encore le maintien ou le renforcement du stockage de carbone.

Globalement, l'agriculture est actuellement un secteur en crise, au centre de multiples débats sur les plans économique, social et environnemental. Le contexte économique est très difficile dans plusieurs filières (prix bas et fluctuants, endettement…) avec notamment des questions sur la répartition de la chaîne de valeur qui ne permet pas à certains agriculteurs de vivre correctement de leur métier. Les questions environnementales sont nombreuses, le climat social tendu (agribashing, évolution des attentes des consommateurs…) et les activités agricoles sont devenues complexes, de plus en plus difficiles à comprendre pour le grand public. L'évolution du système agricole est en cours depuis plusieurs décennies, mais ne peut se faire que dans sa globalité en intégrant les enjeux économiques, sociaux et environnementaux. Au-delà des agriculteurs, c'est l'ensemble des acteurs du monde agricole et alimentaire qui est concerné par cette transition : les coopératives, les entreprises agroalimentaires, les collectivités locales, la grande distribution et les consommateurs.

Le secteur agricole se trouve au cœur de nombreux défis environnementaux : impacts des produits phytosanitaires, qualité de l'eau, de l'air et des sols, changement climatique, biodiversité… En France, la simplification et la spécialisation des systèmes agricoles et des paysages ruraux, favorisées notamment par la mécanisation et le recours aux intrants de synthèse, ont permis d'augmenter les volumes produits et dans certains cas de réduire le prix des aliments fournis à la population. Les analyses montrent cependant que l'évolution de ces systèmes de production se sont faits

au prix d'une dégradation de la qualité des sols, de l'eau, de l'air et de l'érosion d'une partie de la biodiversité au sein des agroécosystèmes, ainsi que d'une dépendance forte aux énergies fossiles (engrais, mécanisation, serres…).

Sur les plans économique et social, le secteur agricole, en particulier l'élevage, subit une crise depuis plusieurs décennies : diminution du nombre d'exploitations, de l'emploi et des revenus dans le secteur ; endettement, pénibilité, dégradation de l'image de l'activité agricole… Par ailleurs, la majorité du secteur s'inscrit également dans un marché mondial régi par des accords commerciaux qui ne tiennent pas nécessairement compte des pratiques les plus vertueuses pour l'environnement. Les évolutions de la PAC (Politique agricole commune), principal outil de soutien à l'agriculture en France et en Europe, permettent une intégration progressive des enjeux environnementaux et climatiques [1]. **L'agroécologie constitue désormais l'axe prioritaire des politiques agricoles conduites en France**.

L'agroécologie se définit comme « une façon de concevoir des systèmes de production qui s'appuient sur les fonctionnalités offertes par les écosystèmes ». Elle les amplifie tout en visant à préserver les ressources naturelles et à diminuer les pressions sur l'environnement par la réduction des émissions de gaz à effet de serre ou encore la limitation du recours aux produits phytosanitaires. Il s'agit d'utiliser au maximum la nature comme facteur de production en maintenant ses capacités de renouvellement [2].

Dans les scénarios, il s'agit donc de penser des évolutions dans le cadre d'une transition globale des systèmes agricoles leur permettant :

- de satisfaire aux besoins alimentaires ;
- de contribuer au développement des produits biosourcés et à la production d'énergie ;
- d'assurer les services écosystémiques, en particulier de préservation de la biodiversité et de stockage de carbone dans les sols.

Par ailleurs, ces scénarios devraient idéalement intégrer l'ensemble des enjeux socio-économiques et environnementaux, ainsi que le rôle du soutien public dans ces évolutions.

La demande alimentaire (*via* les régimes) et les rendements végétaux sont des variables structurantes des évolutions des systèmes agricoles [3]. Ainsi, leur évolution est prise en compte comme une réponse à l'évolution de la demande sociétale. Le développement d'une demande non alimentaire, en particulier pour l'énergie ou les matériaux biosourcés, peut également avoir un impact fort sur les systèmes de production, notamment sur les assolements[1] dans le cas du développement de cultures dédiées à la production de biocarburants première génération ou à la méthanisation [4].

La réflexion sur les scénarios a ainsi été structurée à partir de la demande et en la mettant au regard de l'offre selon les trois questions suivantes :

Quelles évolutions de la demande en France ?

- Quelle demande alimentaire : végétale, animale, qualités environnementales ?
- Quelle demande en bioénergies et produits biosourcés pour substituer des ressources fossiles ? Quelles bioénergies : biocarburants liquides/biogaz/chaleur ?
- Quelles articulations entre biomasses à usages alimentaires et non alimentaires (concurrence, complémentarité) ?

Quelles évolutions des niveaux de production ?

- Quelle surface pour l'agriculture : surface agricole utile (SAU) *vs* surface forestière *vs* surfaces naturelles *vs* surfaces urbanisées ?
- Quelle évolution des rendements des cultures ? Quelle évolution de la productivité animale ?
- Quelle place pour l'agriculture urbaine ?
- Quels niveaux d'importations et d'exportations ?

Quelles évolutions des systèmes de production dont déploiement des pratiques « bas carbone » ?

- Quelle évolution des pratiques d'élevage ? Quel rôle pour les prairies, en particulier permanentes ? Quelle évolution de l'assolement et des pratiques culturales ? Quelles sources et niveaux d'intrants (engrais, produits phytosanitaires) ? Quel couplage entre élevage et cultures ?
- Quelles adaptations à la raréfaction des ressources (carburants, phosphates…) ?
- Quelles adaptations à la raréfaction de la ressource en eau, notamment en été (partage de la ressource en eau entre secteurs, rôle et limites des retenues d'eau, évolution des assolements, des techniques d'irrigation…) ?
- Quelle capacité à réduire les pertes du champ à l'assiette ?
- Quels impacts socio-économiques sur le secteur agroalimentaire et sur les conditions de réalisation des scénarios prospectifs ?
- Quel rôle veut-on donner au secteur agricole pour accroître le puits de carbone et/ou améliorer les services écosystémiques rendus par l'agriculture (exemple des haies, liant stockage et cobénéfice sur la biodiversité) ?

1 https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/diversification-des-assolements/.

1.2. Les enjeux énergétiques et climatiques pour le secteur agricole

Au niveau national, l'agriculture représente environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) nationales [5] et 67 % des émissions liées à l'alimentation. Une part importante de ces émissions est diffuse et liée à des processus biologiques, notamment les émissions de méthane par la fermentation entérique et les effluents d'élevage, ou les émissions de N_2O par les sols lors des processus de nitrification et dénitrification. Elles dépendent de facteurs très variables dans le temps et dans l'espace, comme la météorologie, la saison, les propriétés des sols, les animaux, et peuvent être aggravées par des aléas climatiques ou météorologiques extrêmes. Cette spécificité génère une forte incertitude quant à l'évaluation des émissions du secteur par rapport aux émissions énergétiques (CO_2 principalement). Néanmoins, le secteur agricole dispose de plusieurs leviers pour contribuer à l'atténuation des émissions de GES :

- **réduire les émissions de GES** liées aux systèmes de production, en faisant évoluer les pratiques comme le niveau de certaines productions fortement émettrices [6] ;
- **favoriser le stockage de carbone** dans les sols et la biomasse (préserver et augmenter) [7] [8] ;
- **produire des énergies et des matériaux renouvelables** pour contribuer à réduire les émissions dans d'autres secteurs [9].

L'impact GES de ces leviers doit impérativement être considéré de manière concomitante car ils peuvent amener à des pratiques antagonistes. Par exemple, la production d'énergie à partir des pailles peut réduire le stockage de carbone et affecter la qualité des sols.

L'agriculture est aussi un des premiers secteurs affectés par le changement climatique : hausse des températures, augmentation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère, évolution du régime de précipitations, augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresse, canicule…), érosion de la biodiversité, hausse des teneurs en ozone… Cela concerne aussi bien le niveau de la quantité produite (rendements des cultures et productivité des animaux), la qualité des productions, le bien-être des animaux, la variabilité interannuelle ou encore le prix de vente des denrées sur les marchés internationaux. Les travaux du GIEC mettent en évidence que les évolutions climatiques font peser des risques majeurs sur la sécurité alimentaire, à l'échelle mondiale [8].

De fait, la résilience des systèmes agricoles doit se penser en considérant conjointement :

- **une variabilité accrue** des rendements de production ;
- **la volatilité des prix** des intrants et des produits agricoles au niveau mondial ;
- **une disparité forte entre régions** en termes d'impacts locaux du changement climatique.

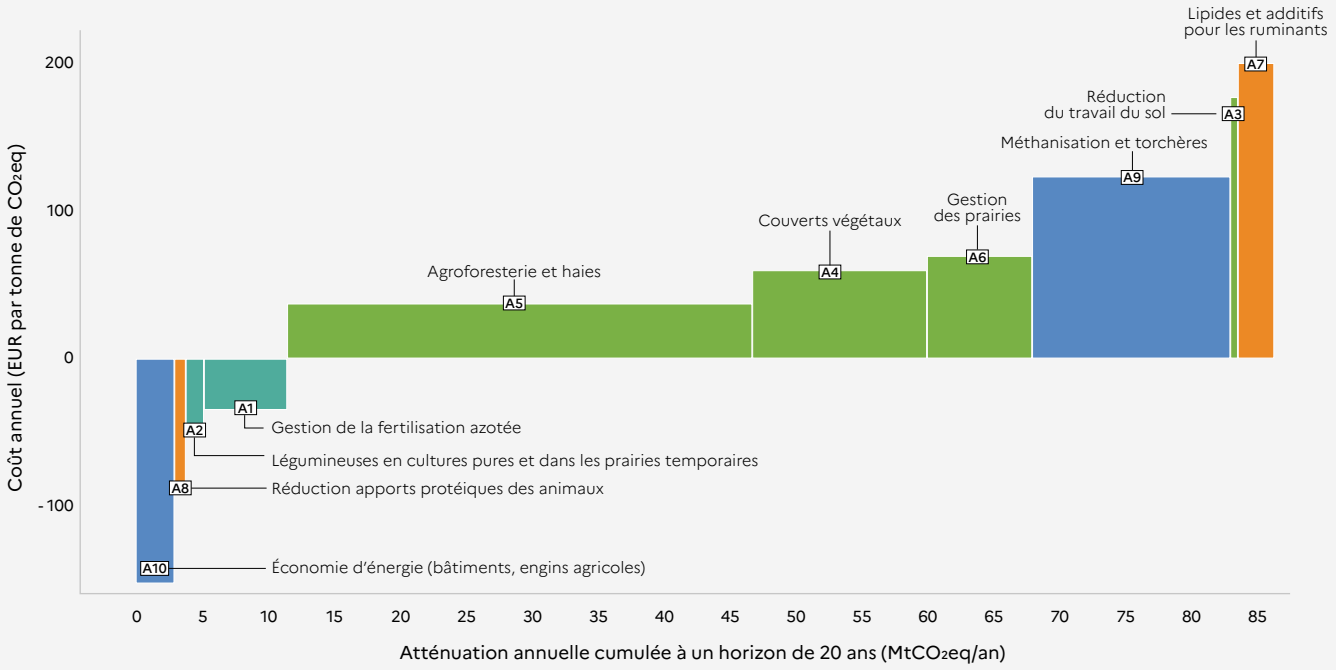
1.3. Quel niveau d'objectifs GES pour le secteur agricole ? Quels autres défis à relever ?

Dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), c'est la division par 2 des émissions de GES (ou facteur 2) par rapport au niveau de 1990, qui est visée pour le secteur agricole à l'horizon 2050 (soit - 46 % entre 2015 et 2050), en cohérence avec les objectifs européens et nationaux. En effet, il n'est pas possible de réduire à zéro les émissions de GES du secteur agricole, en raison notamment d'émissions irréductibles comme celles de N_2O liées à la fertilisation des cultures et de CH_4 liées à la fermentation entérique et aux effluents d'élevage, et du caractère diffus de ces émissions difficilement maîtrisables.

Deux études réalisées par l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) ont proposé des évaluations du potentiel technique de réduction des émissions de GES et de stockage de carbone à horizon 20 ou 30 ans, sans remise en cause majeure des systèmes de productions actuels [6] [10]. Les travaux de l'INRAE ont également permis d'évaluer les coûts de la mise en œuvre des pratiques pour l'agriculteur (hors coûts de transaction). Le *Graphique 1* présente une synthèse du potentiel et des coûts pour ces deux études. Le potentiel technique paraît ainsi élevé (> 80 $MtCO_2eq$/an) pour un coût cohérent (< 200 EUR/tCO_2eq) avec les évolutions envisagées de la valeur tutélaire du carbone.

Ce potentiel reste néanmoins très optimiste au regard des freins organisationnels et sociaux auxquels il va falloir faire face. C'est en particulier le cas des modèles d'affaires à définir et déployer pour pouvoir développer l'agroforesterie sur plusieurs millions d'hectares. De plus, ce potentiel technique de réduction des émissions de GES et de stockage de carbone à horizon 20 ou 30 ans dépend à plus de 50 % de l'accroissement des stocks de carbone, accroissement qui même s'il peut perdurer plusieurs décennies, est fini dans le temps et suppose des pratiques constantes.

Graphique 1 *Coûts et potentiels annuels d'atténuation à horizon 20 ans des émissions de GES des principaux leviers d'action en France métropolitaine*



Note de lecture : l'axe des abscisses représente le potentiel d'atténuation cumulé (*via* réduction des émissions et accroissement du puits) ($MtCO_2eq$/an) et l'axe des ordonnées indique le coût en euros par tonne de CO_2eq réduite, évitée et/ou séquestrée.
N.B. : la plupart des solutions identifiées présentent des cobénéfices pour d'autres enjeux environnementaux (ex. : agroforesteries, haies, allongement des prairies temporaires, méthanisation des effluents d'élevage). Dans ces études, les potentiels ont été évalués sans remise en cause majeure des systèmes de production (ex. : part protéines animales *vs* végétales). Le stockage de carbone dans les sols est considéré sur une profondeur de 1 m. Les coûts peuvent être très variables entre les régions.

Source : recalculés à partir de [6], [10] et [11].

L'atteinte du facteur 2 à l'horizon 2050 et à des horizons plus lointains demande donc d'agir à la fois sur les pratiques agricoles et sur les productions, principalement en lien avec une évolution de la demande alimentaire (ex. : réduction du cheptel bovin en lien avec celle de la part de viande dans les régimes alimentaires) mais aussi des attentes de production énergétique.

Le développement des productions non alimentaires (énergie, matériaux) peut y contribuer, si ces productions sont liées à des pratiques de réduction des émissions de GES et/ou de stockage de carbone. C'est le cas de l'implantation de cultures intermédiaires à vocation énergétique, du développement du bois énergie à partir d'agroforesterie, de la substitution de fertilisants minéraux par des digestats, qui présentent en outre des opportunités de diversification des systèmes agricoles. Elles peuvent également induire des émissions supplémentaires qu'il s'agit de maîtriser, liées par exemple à la fertilisation de couverts, au développement de cultures à forts besoins d'intrants ou encore à des changements d'affectation des sols comme par exemple le remplacement de surfaces forestières par des terres agricoles.

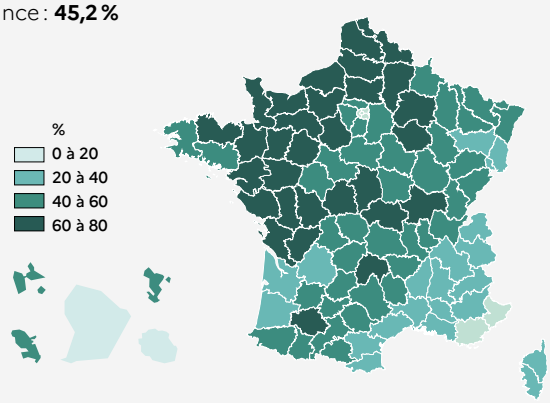
2. Rétrospective des tendances

- **Assolement** : la surface agricole utile (SAU) est en diminution depuis les années 1950 *(Figure 1)* : -17 % entre 1950 et 2019[2], avec 28,6 millions d'hectares en 2019. Les surfaces de grandes cultures ont progressé tandis que celles des cultures fourragères et des cultures permanentes ont diminué. De 2005 à 2015, la surface toujours en herbe a fortement diminué (-0,53 Mha), de même que la surface totale irriguée, qui voit sa part dans la SAU baisser depuis 2010 *(Graphique 2)*. Près de 35 % des surfaces cultivées sont conduites en techniques culturales simplifiées[3], mais la mise en œuvre de ces techniques pose néanmoins la question des moyens de lutte contre les mauvaises herbes. En 2006, 7,8 % des parcelles en cultures annuelles ont été implantées avec une culture intermédiaire (+ 3,5 % en 2011). Les bassins de production agricole se sont fortement spécialisés ces dernières décennies, conduisant à une moindre résilience face aux aléas climatiques et au manque de circularité à l'échelle locale : peu d'optimisation de l'usage des fertilisants organiques, limitant le bouclage des cycles biogéochimiques[4] d'éléments majeurs pour la fertilité des sols, tels que l'azote ou le phosphore…

- **Rendements des grandes cultures** : les rendements des grandes cultures stagnent ou montrent une évolution ralentie depuis les années 1990, alors qu'ils n'avaient cessé d'augmenter depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. La plupart des grandes cultures sont concernées avec tout de même une variabilité entre cultures. Ainsi, le rendement du maïs a poursuivi sa progression. On observe également une variabilité interannuelle forte, en lien avec le climat. Il existe par ailleurs un écart notable des rendements de l'agriculture biologique par rapport à ceux de l'agriculture conventionnelle, de l'ordre de -8 à -25 %, variable selon les cultures et les bassins de production [12].

Figure 1 Part de la SAU dans la surface totale française

Territoire agricole
Part de la SAU dans la surface totale du département
France métropolitaine : **52, 2 %**
France : **45,2 %**

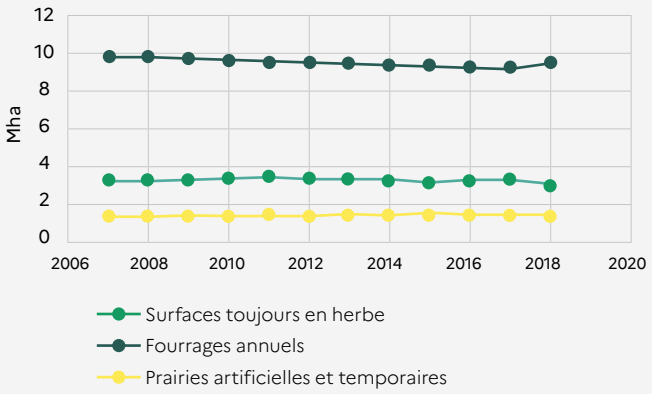


	1950	1980	2000	2010	2019p
Grandes cultures (kha)	**11 812**	**11 620**	**13 459**	**13 136**	**12 874**
part (%)	34,3	36,6	45,2	45,4	45
Cultures fourragères (kha)	**19 511**	**18 194**	**14 691**	**14 339**	**14 229**
part (%)	56,7	57,3	49,3	49,6	49,7
Cultures permanentes (kha)	**2 050**	**1422**	**1 141**	**1 011**	**1 010**
part (%)	6	4,5	3,8	3,5	3,5
Autres* (kha)	**1 035**	**508**	**517**	**440**	**524**
part (%)	3	1,6	1,7	1,5	1,8
TOTAL superficie agricole utilisée (kha)	**34 408**	**31 744**	**29 807**	**28 926**	**28 637**
France métropolitaine (%)	100	100	100	100	100
Part de la SAU dans la surface totale en France métropolitaine	62,6	57,8	54,3	52,7	52,2

* Légumes frais et secs, fleurs et plantes ornementales, semences et plants divers, jardins et vergers familiaux des exploitants et des non exploitants.

Sources : Agreste.

Graphique 2 Surfaces toujours en herbe et prairies artificielles en France métropolitaine et ultramarine entre 2006 et 2018



Sources : Agreste.

2 Source : Agreste.
3 https://dicoagroecologie.fr/techniques-culturales-simplifiees/.
4 « Le bouclage des cycles de nutriments est un processus cherchant à compenser les exportations d'éléments minéraux essentiels au développement des végétaux et des animaux tels que l'azote, le phosphore, le potassium et le soufre. Il permet d'améliorer l'autonomie des exploitations agricoles et des territoires », https://dicoagroecologie.fr.

- **Agroforesterie et haies** : le système agroforestier majoritaire est constitué par le bocage, caractérisé par la formation linéaire de haies. La surface totale de haies et d'alignements d'arbres est en baisse (-6 % en huit ans). Les prés-vergers et les bosquets (bois de surface inférieure à 0,5 ha) seraient également en recul (-21 000 ha/an entre 2012 et 2014)[5].

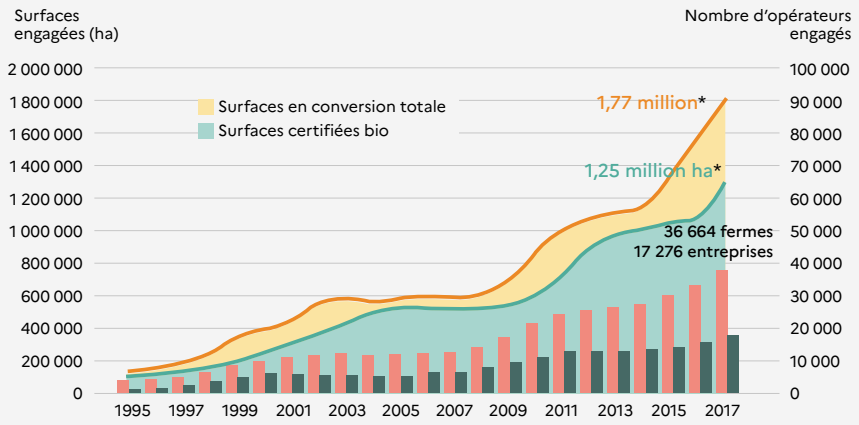
- **Fertilisation** : les livraisons d'engrais minéraux sont relativement stables ces dernières années. Sur une période plus longue remontant au début des années 1970, la livraison d'azote minéral a augmenté, alors que celles du phosphore et du potassium ont diminué.

- **Produits phytosanitaires** : plusieurs plans Ecophyto ont été mis en place depuis 2009. Néanmoins, la vente de ces produits ne diminue pas.

- **Agriculture biologique** : ces dernières années, l'agriculture biologique se développe avec une augmentation du nombre d'exploitations, des surfaces et des ventes, ainsi que du nombre d'entreprises des secteurs aval [13]. Grandes cultures, fruits, légumes et vigne sont les cultures bio les plus dynamiques *(Graphique 3)*. En 2019, l'agriculture biologique représentait près de 2,3 Mha de surfaces agricoles, soit près de 8,5 % de la SAU et 6 % des achats alimentaires des ménages français. Le marché connaît une croissance dynamique.

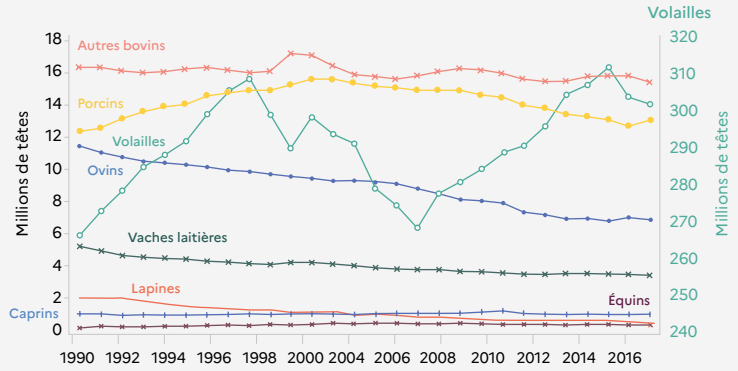
- **Cheptels** : le *Graphique 4* présente les évolutions des différents cheptels, reconstituées par le CITEPA. Le cheptel bovin est en réduction depuis plusieurs décennies, mais la productivité moyenne par tête est à la hausse. De même, le cheptel porcin suit une tendance globale à la baisse ces dernières

Graphique 3 *Évolution du nombre d'opérateurs (fermes et entreprises aval) et des surfaces engagées en bio*



* Estimations.
Sources : Agence bio, 2018.

Graphique 4 *Évolution des cheptels agricoles en France métropolitaine*



Sources : CITEPA, 2019.

5 Enquête d'utilisation du territoire Teruti-Lucas.

décennies, avec un léger redressement récemment. Actuellement, l'équilibre mondial offre/demande en viande porcine est impacté par la peste porcine « africaine » qui a notamment durement touché le cheptel de la Chine, premier consommateur mondial. Des modèles émergents plus durables se développent (porc sur paille, porc bio). La production de volailles suit une tendance globale à la baisse depuis le début des années 2000, marquée néanmoins par de légères reprises certaines années. Le cas du poulet se distingue de la filière globale, avec une dynamique croissante. La filière label Rouge connaît une progression ces dernières années.

- **Importations/exportations dans le secteur agroalimentaire** : globalement depuis 2000, l'excédent agroalimentaire se maintient, avec des tendances à la hausse aussi bien pour les importations ou les exportations, qu'il s'agisse de produits bruts ou de produits transformés. Les principales exportations concernent les céréales, le lait et les boissons alcoolisées. La dépendance protéique de la France augmente depuis les années 1990 en lien avec la progression de la part des importations de protéines pour l'alimentation animale [14]. Le volume d'importation de soja (huiles et tourteaux) en 2017 est de 3,5 Mt. La production de soja en France est de 0,4 Mt. La dépendance de la France aux importations, principalement brésiliennes, est très nette. Le volume importé d'huile de palme est proche de 0,45 Mt en 2013 [15]. Concernant les viandes bovines et porcines, les importations et les exportations sont globalement en baisse depuis 2010. Les importations de la filière volaille augmentent depuis 2000.

- **Bioénergies** : les surfaces mobilisées en France pour les biocarburants sont estimées à environ 3 % de la SAU[6], soit 800 000 ha en 2015. Cette estimation s'appuie sur les quantités de biocarburants qui sont traduites en surfaces cultivées, tout en tenant compte des valorisations des coproduits, en particulier le tourteau pour l'alimentation animale. Les installations de méthanisation suivent une dynamique croissante depuis une dizaine d'années. Les taillis à courte rotation (TCR) et très courte rotation (TTCR), mobilisés pour produire de l'énergie, sont en croissance ces dernières années, bien que les surfaces concernées restent au global modestes : près de 4 100 ha en 2019[7]. Le miscanthus quant à lui connaît une progression dynamique depuis plus d'une décennie, atteignant une surface de 6 400 ha en 2019 [16].

- **Produits biosourcés** : la place des produits biosourcés dans la transition écologique et énergétique reste encore assez modeste. La surface dédiée à ces filières était estimée à 0,35 % de la SAU en 2012 [17]. Un chapitre y est dédié dans ce rapport.

- **Efficacité énergétique** : en 2004, la consommation d'énergie finale du secteur agricole (incluant forêt et pêche) a atteint un pic de 55,5 TWh, avant de se stabiliser à environ 52 TWh. Ceci représente moins de 3 % de la consommation d'énergie finale de la France en 2015, pour un mix énergétique dominé par les produits pétroliers à 75 % [18]. Par ailleurs, l'agriculture est dépendante de l'énergie *via* ses intrants, notamment l'utilisation d'engrais de synthèse dont la production nécessite beaucoup d'énergie.

6 Données FranceAgriMer.
7 TCR de peuplier, eucalyptus, robinier, aulne, bouleau, charme, châtaignier, érable, frêne et merisier ; TTCR de saule.

3. Description de l'état actuel

Pour la description de l'état actuel du secteur agricole, en plus des données présentées ci-dessus, l'outil ClimAgri® a été utilisé avec des valeurs sur l'année 2015 pour les données d'entrée et de résultats du diagnostic consommation d'énergie/émissions de GES/qualité de l'air du secteur agricole à l'échelle de la France. Ce travail s'est appuyé notamment sur des données d'Agreste ainsi que des données de la prospective agricole menée dans le cadre de la SNBC.

Concernant les productions du secteur, l'élevage de ruminants suit une tendance à la baisse. Les légumineuses manquent d'un marché et de filières structurées pour se développer. Néanmoins, les politiques publiques de ces dernières années tendent à encourager le développement de l'agroécologie. L'agriculture biologique poursuit quant à elle son développement.

Les tendances émergentes récentes suivantes ont été prises en compte dans le cadre de cet exercice de prospective :

- les évolutions de la PAC (réforme de 2021) ;
- les accords internationaux ;
- l'évolution des régimes alimentaires aux niveaux national et européen *vs* mondial ;
- le développement du bio, à la fois la production de l'agriculture biologique (AB) et la consommation de produits issus de cette production ;
- les objectifs d'arrêt du glyphosate et autres molécules de synthèse ;
- le développement de la méthanisation ;
- l'évolution des biocarburants avec les perspectives de développement des 2e et 3e générations (2G et 3G) ;
- la diversification *vs* la spécialisation à l'échelle territoriale ;
- la recherche d'autonomie de certains agriculteurs ;
- le développement de l'agriculture urbaine ;
- les innovations dans la production alimentaire : insectes, viande de synthèse ;
- le développement des dispositifs de compensation carbone impliquant le secteur agricole ;
- le plan protéines végétales [19].

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios

La modélisation du secteur agricole a été réalisée grâce à l'outil MoSUT développé par Solagro [20] [21][8] dans le cadre du projet SISAE[9]. Il s'agit d'un outil de modélisation du système agricole qui permet d'identifier une ou plusieurs trajectoires possibles pour atteindre un ensemble d'objectifs fixés au préalable et qui propose en sortie une représentation du système agricole, alimentaire et forestier. Dans le cadre de la modélisation MoSUT, ClimAgri® traite spécifiquement la production agricole.

Les systèmes productifs futurs y sont imaginés à partir de systèmes représentatifs actuels (des « fermes types ») projetés à l'horizon 2050 par l'intégration de pratiques agronomiques et d'évolutions techniques clairement identifiées et documentées dans la littérature scientifique et technique.

En tenant compte de l'évolution des différents systèmes productifs et des besoins en denrées alimentaires et non alimentaires issues de la biomasse agricole et forestière, ce modèle permet d'ajuster l'offre et la demande, en tenant compte également d'hypothèses sur les échanges internationaux. La modélisation effectuée est itérative, avec un ajustement des hypothèses et résultats réalisé en cohérence avec les autres secteurs liés (alimentation, bioénergie, autres produits biosourcés…).

Parmi les données phares de la modélisation : les surfaces, productions, pertes et gaspillages, consommations, transformations, importations, exportations. Dans la modélisation, ClimAgri®[10] permet d'évaluer les impacts des scénarios sur des variables clés du secteur agricole, notamment les consommations d'énergie et d'eau, les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que d'autres indicateurs environnementaux.

Les hypothèses quantitatives sur les régimes alimentaires et leurs évolutions sont développées dans le cadre du projet SISAE (*cf.* chapitre *2.1.4 Alimentation*) et portent principalement sur la population totale française (Métropole), les besoins en calories et en protéines, la proportion de protéines végétales dans le total de protéines, les pertes et gaspillages, les consommations finales (pertes et gaspillages déduits) par produit ou catégorie de produits (céréales, sucre, légumineuses, viande…).

Par souci de simplification pour la modélisation, sur le volet productions agricoles, trois modèles agricoles types sont décrits. Ils se différencient en particulier sur leur niveau de recours aux intrants de synthèse (fertilisants azotés et produits phytosanitaires) *(Tableau 1)* :

- **bas niveau d'intrants de synthèse :** rassemble les systèmes à très bas niveaux d'intrants de synthèse. Il s'agit principalement de l'agriculture biologique mais aussi de systèmes qui s'en rapprochent tout en utilisant de faibles apports d'azote et d'amendements minéraux. Même si les systèmes « Bas intrants de synthèse » de 2050 sont des systèmes améliorés grâce à la recherche et l'innovation, comparés aux systèmes équivalents actuels, ils assument une baisse de rendement conséquente par rapport aux deux autres types de modèles décrits ci-dessous ;

- **production intégrée[11] :** rassemble les systèmes qui maximisent les ressources et mécanismes de régulation naturels pour remplacer des apports d'intrants dommageables à l'environnement sans les bannir. La production intégrée vise des objectifs de rendements réalistes et non maximum. Elle s'appuie notamment sur les principes de l'agroécologie avec des rotations et des assolements diversifiés et favorise la présence d'habitats pour la biodiversité et des auxiliaires des cultures ;

8 Il est également décrit dans la brochure Afterres2050, disponible en ligne, qui reprend et actualise la description méthodologique de MoSUT.
9 SISAE : Simulation prospective du Système Alimentaire et de son Empreinte Carbone, CIRED-CNRS, SMASH, Solagro, EDF, UMR LAET-ENTPE, PHILABS, INRAE/INSERM Unité EREN ; en cours.
10 https://www.ademe.fr/climagri.
11 http://ephytia.inra.fr/fr/C/20381/TeSys-Leg-Glossaire.

- **conventionnel raisonné :** rassemble les systèmes dont l'objectif de maximisation des rendements est dominant et les rotations peu diversifiées par rapport à l'actuel. Les réductions de consommation d'intrants sont principalement permises par des innovations technologiques comme par exemple les produits de biocontrôle/biostimulants, l'agriculture de précision, la sélection variétale…

Outre les pratiques et technologies mises en œuvre, les niveaux d'intrants sont déterminés par les incitations, notamment règlementaires. Ainsi, selon les scénarios, les réductions d'intrants pourront être plus ou moins importantes pour un même modèle (ex. : différence entre S3 et S4 pour le conventionnel raisonné et la production intégrée).

Les hypothèses quantitatives portent notamment sur les surfaces et leur allocation (céréales, oléagineux, protéagineux, prairies…), la place des légumineuses, les cheptels (par catégories d'animaux : vaches laitières, vaches allaitantes, nombre de places de poulets de chair…) et les niveaux de production (production de lait par vache par exemple). Diverses autres hypothèses sont posées pour décrire les systèmes de production : proportion des trois modèles agricoles décrits ci-dessus, rendements des cultures, volumes d'irrigation, consommation en azote minéral, surfaces de haies et d'agroforesterie…

Des hypothèses sur les surfaces dédiées à la production de protéines non agricoles (aquaculture, entomoculture[12], viande de synthèse et autres protéines alternatives) sont aussi décrites. Les usages non alimentaires de la biomasse sont également intégrés comme la part de cultures dédiées ou le niveau de développement de la méthanisation agricole.

Des choix ont aussi été faits sur les niveaux d'import/export des différentes productions agricoles en cohérence avec les besoins alimentaires et la philosophie de chaque scénario. La cohérence du système dans son ensemble est également vérifiée, principalement au travers du calcul du bilan azote et du bilan fourrager.

Une étude prospective des filières protéines végétales et animales est en cours à date de rédaction de ce document par le groupement [Futuribles, CERESCO, AlimAvenir] pour l'ADEME.

Tableau 1 Part des différents modèles agricoles à l'horizon 2050 et abattement d'Indice de fréquence de traitement (IFT) estimé

		TEND	S1	S2	S3	S4
Bas intrants de synthèse	Part de la SAU (%)	20	70	50	20	10
	Réduction d'IFT (hors produits utilisés en AB) estimée (%)	- 100 (0 produit phytosanitaire de synthèse)				
Production intégrée	Part de la SAU (%)	10	30	50	50	20
	Réduction d'IFT (hors produits utilisés en AB) estimée (%)	- 25	- 25	- 50	- 50	- 25
Conventionnel raisonné	Part de la SAU (%)	70	-	-	30	70
	Réduction d'IFT (hors produits utilisés en AB) estimée (%)	- 15	-	-	- 25	- 15

12 Production d'insectes.

5. Stratégies pour le secteur selon chaque scénario

Dans cet exercice de prospective, les systèmes agricoles n'atteignent pas la neutralité carbone dans la mesure où les objectifs de maintien d'un niveau de productivité élevé sont nécessaires, tant pour subvenir à la demande alimentaire et non alimentaire (principalement à destination de l'énergie) que pour maintenir une balance commerciale favorable.

Le choix a néanmoins été fait de décrire quatre trajectoires visant l'atteinte du facteur 2 à l'échelle de la production agricole, en accord avec l'objectif de réduction de - 46 % des émissions de GES du secteur agricole entre 2015 et 2050 dans la SNBC, en activant plusieurs leviers structurants, à des niveaux variables selon les scénarios :

Tableau 2 Sollicitation des leviers principaux de décarbonation (de la teinte la plus claire à la plus sombre : intensité de l'action)

Levier	TEND	S1	S2	S3	S4
Réduction des pertes et gaspillages	Très faible	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
Baisse de la consommation de viande	Très faible	Fort	Moyen	Faible	Rien
Réduction des apports de fertilisants azotés de synthèse	Très faible	Fort	Moyen	Faible	Très faible
Intensification des pratiques d'élevage	Moyen	Rien	Rien	Faible	Fort
Stockage de carbone*	Très faible	Moyen	Fort	Moyen	Très faible
Réduction de la déforestation importée**	Très faible	Fort	Moyen	Faible	Rien
Production d'énergies renouvelables***	Très faible	Faible	Faible	Fort	Moyen

☐ Rien ▫ Très faible ▪ Faible ■ Moyen ■ Fort

* Dans les sols et la biomasse agricole.
** Liée à l'évolution de l'alimentation animale ou des imports pour un usage énergétique.
*** Pour la décarbonation des autres secteurs.

La réduction des pertes et gaspillages a été répartie de façon homogène sur les différents postes du champ à l'assiette, avec une mobilisation plus ou moins forte des leviers selon les scénarios. Par exemple, pour la production, la réduction dans S1 et S2 (principalement) devrait passer par une formation systématique des professionnels opérationnels et saisonniers, un assouplissement en profondeur des cahiers des charges en lien avec les distributeurs, le développement de circuits alternatifs pour l'écoulement systématique des produits non conformes, une offre en circuit court optimisée… tandis que dans S3 et S4, cette réduction sera rendue possible par l'innovation technique (agriculture de précision) permettant de réduire les pertes au champ (production et récolte).

Pour la transformation, les principaux leviers activables devraient être le rapprochement des unités de transformation et des lieux de production (S1 et S2), la mise en place de diagnostics réguliers pour corriger tout accident de process, le développement de circuits alternatifs pour l'écoulement systématique des produits non conformes, ou encore la généralisation du don.

5.1. Scénario tendanciel

Ce scénario est conçu en extrapolant les principales tendances actuelles à l'horizon 2050, à partir des statistiques disponibles sur ces 30 dernières années et en s'appuyant sur le scénario SNBC-AME (avec mesures existantes) *(Tableau 3)*. Globalement, on peut souligner une diminution de la SAU de près de 4 Mha, dont une diminution des surfaces de prairies[13], sous l'effet notamment de l'artificialisation et du développement des surfaces forestières, gagnées sur les terres arables, sur les landes et sur les prairies. La plupart des cultures voient leurs surfaces diminuer. Celles qui progressent légèrement sont le soja, les protéagineux et les cultures légumières.

13 Environ 100 kha de prairies « productives » deviennent « peu productives » suite à une chute du rendement sous l'effet du climat.

Les rendements des principales cultures baissent légèrement, compte tenu du contexte de changement climatique (ici, scénario RCP 8.5) et de la stagnation déjà amorcée sur les rendements de plusieurs cultures depuis le milieu des années 1990. La consommation d'azote minéral poursuit sa diminution tandis que les besoins en eau augmentent d'environ 30 % (liée à une hausse de l'évapotranspiration due à l'évolution des paramètres climatiques) avec une part estivale proche de l'actuelle. Les surfaces de légumineuses progressent. Les systèmes « bas intrants » et « production intégrée », dont les systèmes en agriculture biologique, se développent faiblement (14 % de la SAU en 2050). Les surfaces en haies et agroforesterie sont globalement stables. La productivité laitière suit une tendance à la hausse qui s'explique par une intensification modérée et par les tendances observées sur les plans génétique et technique. Les cheptels bovins poursuivent leur diminution. L'évolution des cheptels des monogastriques est contrastée : - 44 % et - 25 % respectivement pour les cheptels porcins et de dindes ; + 40 % pour les poulets de chair et + 9 % pour les poules pondeuses. L'indice de consommation des poulets de chair s'accroît légèrement du fait d'une augmentation des productions sous signe de qualité, qui représentent 40 % des effectifs. La France demeure excédentaire en céréales et devient légèrement déficitaire en lait, en raison d'une forte réduction du cheptel qui ne s'est pas accompagnée d'une évolution similaire de la demande. Elle devient fortement déficitaire en viande bovine et en viande porcine et les exportations de viande de volailles augmentent. Au total, le déficit en viande atteint 20 % de la production. Le déficit en fruits et légumes se creuse, en raison d'une hausse de la consommation qui ne s'est pas accompagnée d'une hausse de la production qui est restée stable. Les surfaces dédiées à un usage non alimentaire restent faibles dans ce scénario tendanciel, la production de bioénergie étant principalement basée sur la ressource bois puis dans une moindre mesure sur la méthanisation d'une partie des déjections animales et des résidus de cultures (*cf.* chapitres *2.3.1. Mix gaz* et *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). Les produits biosourcés issus de l'agriculture demeurent marginaux autant en termes de surface que de tonnages comparés aux usages alimentaires.

Tableau 3 Principales variables descriptives des systèmes agricoles. État actuel (2020) et évolution tendancielle en 2050

	2020	TEND	Évolution (%)
SAU [Mha]	28,8	25,1	- 13 %
Prairies permanentes [Mha]	9,3	8,8	- 5 %
Prairies temporaires [Mha]	2,8	1,9	- 32 %
Grandes cultures (céréales, oléoprotéagineux et cultures fourragères) [Mha]	16,8	14	- 17 %
Fixation symbiotique de l'azote (légumineuses) [ktN]	338	441	30 %
Consommation d'azote minéral [Mt]	1,9	1,6	- 16 %
Part d'azote organique (fixation symbiotique, digestats et composts) [%]	24	32	8 %
Rendements blé tendre [t/ha]	6,8	6,8	- 1 %
Nombre de places porcs (charcutier et intensif) [Milliers de places]	7 152	4 061	- 43 %
Productivité laitière [Milliers de litres lait/an/vache]	6,8	8,3	22 %
Cheptel bovin lait – mères [Milliers de têtes]	3 590	2 107	- 41 %
Cheptel bovin viande – mères [Milliers de têtes]	4 119	3 896	- 5 %
Volaille de chair [Millions de places]	180,2	252,6	40 %
Volaille pondeuse [Million de places]	58,3	63,7	9 %
Cultures fourragères [Mha]	4,9	3,6	- 27 %
Part d'agriculture à bas niveaux d'intrants* [%]	5	20	300 %
Part de systèmes en production intégrée* [%]	2	10	400 %
Part de systèmes conventionnels raisonnés* [%]	93	70	- 25 %
Haies [Milliers de km][14]	500*	547	8,6 %
Surfaces en agroforesterie (75 arbres/ha)[15] [Milliers d'ha]	140	232	66 %
Couverts végétaux [Mha]	1,1	2,2	100 %
Solde céréales (hors bière) [kt]	23 513	17 064	- 27 %
Solde oléagineux [kt]	- 695	- 499	- 28 %
Irrigation [Mdm³]	2,7	3,6	33 %
Surfaces irriguées [Mha]	1,7	2,6	53 %

** Cf. Tableau 1.*

* Ordre de grandeur basé sur les estimations de Pointereau (2006)[16]. Les estimations du linéaires de haies à l'échelle nationale sont lacunaires et pourront être précisées *via* le dispositif national de suivi des bocages.

Source : SNBC-AME et simulations Solagro.

14 Données 2020 extrapolées des données APCA.
15 Données 2020 extrapolées de l'étude 4p1000, page 206.
16 https://rmt-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/documents/rnhc-interv-pointereau.pdf.

5.2. Scénario 1 : vers des systèmes à bas niveaux d'intrants de synthèse

Dans ce scénario, l'évolution du secteur agricole est pilotée par l'évolution de la consommation, liée à la fois à des contraintes et à une sobriété choisie. Cette évolution repose sur un changement majeur de comportement visant une économie maximale de ressources et une réduction drastique de l'empreinte des activités humaines sur les milieux naturels.

La SAU totale diminue par rapport à la situation actuelle, avec un développement marqué de la forêt de + 3 Mha, par conversion de prairies et de terres arables et par l'évolution spontanée des landes et friches. Les surfaces artificialisées reculent d'environ 0,2 Mha et laissent la place à des espaces naturels (*cf.* chapitre *2.1.1. Aménagement territorial et planification urbaine*) qui gagnent par ailleurs aussi sur les terres arables du fait de la déprise agricole et d'une volonté générale de restaurer les écosystèmes, qu'illustre par exemple le développement important des réserves naturelles.

Pour répondre aux attentes des consommateurs, particulièrement soucieux des questions environnementales, sanitaires et de bien-être animal, **les systèmes de production** « bas intrants » se développent fortement : 70 % des systèmes en 2050 sont à « bas niveaux d'intrants de synthèse » 30 % sont à « protection intégrée » et les productions sous serres chauffées diminuent de 80 %. L'évolution du climat et la volonté de réduire la dépendance au commerce international pourraient permettre de développer de nouvelles cultures telles qu'agrumes, amandiers et sésame dans les régions méditerranéennes ou le coton dans le Sud-Ouest.

En lien avec cette évolution, **la fertilisation minérale** baisse de 40 % et **l'usage des produits phytosanitaires de synthèse** est en forte diminution. **Les rendements** sont significativement plus bas (- 25 % sur le blé tendre par exemple), dans le contexte de changement climatique et de la hausse des surfaces en agriculture à bas intrants de synthèse et malgré un relatif rattrapage de ces modèles par rapport au conventionnel. Face à la baisse marquée de la consommation de viande, l'élevage diminue de manière notable (quasi disparition des élevages intensifs de porcs et volaille, baisse de 85 % des cheptels de bovins viande par rapport à l'état actuel). Les systèmes de type extensif dominent. La surface des prairies atteint son niveau le plus faible parmi les différents scénarios, bien que les systèmes en herbe intégral ou avec très peu de concentrés représentent près de la moitié du cheptel. Dans ce scénario, les surfaces de légumineuses s'accroissent significativement. De même, les haies et systèmes agroforestiers progressent de manière notable, permettant ainsi un développement des services écosystémiques. Les céréales, oléoprotéagineux et les légumes remplacent une grande partie des **productions fourragères** (maïs et autres cultures fourragères, prairies temporaires ou artificielles), qui disparaissent pratiquement sur terres arables. Ces productions fourragères restent suffisantes pour alimenter les cheptels de ruminants et dégagent un solde excédentaire qui permet de faire face aux aléas climatiques (surplus d'herbe de 10,5 Mt de matière sèche).

Dans ce scénario, les terres arables sont aussi sollicitées pour la **production de bioénergies** (163 TWh) : maintien de la production de biocarburants liquides, augmentation du bois énergie issu de l'agroforesterie et autres arbres hors forêt. La méthanisation se développe dans la majorité des exploitations agricoles, mais au niveau le moins élevé parmi les quatre scénarios (environ 109 TWh), au travers d'unités de taille modérée (*cf.* chapitre *2.3.1. Mix gaz*).

Ce modèle agricole nécessite annuellement 1,9 milliard de m³ d'eau, dont environ 23 % pour les cultures estivales. Les **surfaces irriguées** diminuent de 14 % par rapport à 2020, avec un usage majoritaire pour les productions de fruits et légumes.

De façon générale, les productions actuellement excédentaires le restent encore en 2050. **Les importations et les exportations** de denrées agricoles évoluent en cohérence avec l'évolution des régimes alimentaires : baisse de la consommation des produits exotiques, baisse de la consommation de viande, volonté de consommer des produits locaux et de saison… Ainsi, la France continue d'exporter des céréales (car la demande pour le bétail a presque autant diminué que la production sur le territoire) mais dans une moindre mesure que la situation actuelle. Le solde exportateur de la viande s'améliore. Celui du lait devient faible en raison d'une baisse de la productivité, tout comme celui des pommes de terre. Pour les fruits et les légumes, les soldes importateurs ont très nettement diminué, grâce à la substitution d'une partie des fruits d'origine tropicale par des productions locales et par le développement de nouvelles productions (agrumes…).

5.3. Scénario 2 : diversification et reterritorialisation des systèmes de production

Dans ce scénario, l'évolution du secteur est pilotée à la fois par une baisse de la consommation (évolution profonde des régimes alimentaires) et par le souhait de développer plus de coopération régionale, ce qui se traduit par une diversification accrue des systèmes destinée à mettre en avant les complémentarités et synergies entre cultures et élevage comme par exemple le bouclage des cycles du carbone, de l'azote et du phosphore. Les territoires qui en résultent sont donc plus diversifiés. Le niveau de la SAU est de 27,7 Mha, le plus élevé parmi les quatre scénarios. **Les systèmes de production** évoluent vers 50 % à « bas niveaux d'intrants » et 50 % de « production intégrée ». Les surfaces de prairies diminuent au profit d'accrus forestiers (+ 0,6 Mha par rapport à l'état actuel). Dans ce scénario, la recherche d'autonomie alimentaire nationale reste forte, ce qui amène à un fort développement des surfaces maraîchères, fruitières et de grandes cultures au détriment de cultures fourragères (- 2 Mha par rapport à l'état actuel). Néanmoins, les surfaces de vigne continuent à décroître en lien avec la baisse de la consommation de vin et des exportations.

La fertilisation minérale est ainsi réduite de 55 % par rapport à l'état actuel et l'usage des produits phytosanitaires diminue fortement. Les légumineuses se développent également de façon importante. Comme dans S1, un développement des haies et de l'agroforesterie est prévu, avec en conséquence le développement des services écosystémiques associés. Le niveau des surfaces de prairies est légèrement supérieur à celui du S1 (8,4 Mha au lieu de 8,1 Mha).

L'évolution des régimes alimentaires vers une moindre consommation de produits carnés entraîne une réduction des différents **cheptels** sur le territoire, en particulier pour les bovins viande (-60 %), mais aussi les cheptels bovins lait (-20 %). Les systèmes évoluent vers des modèles plus herbagers et mixtes (viande-lait), les systèmes sans pâturage disparaissent et les systèmes intensifs basés sur les cultures fourragères et les concentrés diminuent fortement. Cette évolution des systèmes est favorable au développement des services écosystémiques. Ainsi, le bilan fourrager est largement excédentaire, ce qui contribue grandement à la résilience des élevages bovins. L'évolution de ces cheptels, couplée à une recherche de qualité et de bien-être animal, entraînent une baisse de la productivité laitière (5 700 litres/tête en 2050 contre 6 800 actuellement). La recherche de qualité est aussi poussée en monogastriques : bien-être amélioré, labels, fin des élevages en cages…

En cohérence avec la demande en biocarburants pour le transport, les productions dédiées à des biocarburants 1G se réduisent au profit de productions permettant la synthèse de biocarburants 2G. La méthanisation d'origine agricole se traduit par une consommation de biomasse de 108 TWh et repose notamment sur des cultures intermédiaires (46 TWh) mais aussi sur les résidus de cultures, les prairies et les déjections d'élevage (30, 16 et 11 TWh). Dans une logique d'économie circulaire, les digestats sont majoritairement valorisés dans leur région de production. La demande en **bioénergie** de ce scénario est telle qu'une part importante du bois issu des haies, de l'agroforesterie intraparcellaire et des arbres urbains est valorisée pour permettre la production de 25 TWh.

L'évolution des assolements et des pratiques culturales entraîne une augmentation des surfaces irriguées à 2 Mha, dont 50 % de surfaces de fruits et légumes. Les **surfaces irriguées** en grandes cultures restent stables, la diminution des surfaces en maïs étant compensée par l'augmentation des surfaces irriguées en céréales. Dans ce scénario, l'évolution des pratiques favorables à la couverture des sols, la recherche du respect de la saisonnalité des produits et les améliorations techniques (choix variétaux, ir-

rigation de précision…) permettent malgré tout de réduire les volumes totaux d'irrigation (- 36 % par rapport au tendanciel), en particulier sur la période estivale (- 60 %).

Dans ce scénario, par rapport à la situation actuelle, le solde exportateur pour la viande au global se maintient, avec toutefois des évolutions selon les types de viande avec moins de viande de volailles exportée et un solde qui s'améliore pour les viandes bovine et porcine. Le solde exportateur des céréales reste excédentaire mais dans une moindre mesure que la situation actuelle. Les exportations de lait diminuent fortement. La diversification des productions fruitières et légumières, couplées à l'évolution du contenu de l'assiette, permettent pratiquement de couvrir la demande française et de réduire le solde importateur.

5.4. Scénario 3 : des territoires spécialisés pour des productions optimisées

Dans ce scénario, l'évolution du secteur agricole est guidée par l'offre et par la recherche d'une optimisation généralisée des procédés de production. Les territoires sont plus spécialisés. Néanmoins les bouclages des cycles du carbone, de l'azote et du phosphore sont optimisés à l'échelle nationale, entre les régions. Dans ce scénario, **la SAU et les terres arables** reculent respectivement de 1,7 Mha et 2,6 Mha, du fait d'une progression des surfaces forestières (+ 0,7 Mha) et des surfaces artificialisées (+ 0,8 Mha) ou de surfaces de cultures énergétiques lignocellulosiques installées sur des prairies naturelles, des terres arables, des landes et des cultures fourragères. Les cultures maraîchères et fruitières se développent, en particulier les filières déjà performantes actuellement. Dans le même temps, comme dans les deux premiers scénarios, les surfaces de vigne reculent en raison d'une baisse de la consommation et des exportations de vin du fait des taxes instaurées par les États-Unis ou encore par les effets du Brexit [22]. L'augmentation des légumineuses est moindre que dans les précédents scénarios.
Soutenus par une évolution des aides publiques et des attentes des consommateurs, **les systèmes agricoles à « bas niveaux d'intrants »** se sont développés mais de façon marginale, puisqu'ils représentent 20 % des systèmes agricoles. La majorité des systèmes conservent une orientation productive forte, avec 50 % des systèmes en « production intégrée » et 30 % de systèmes en conventionnel raisonné. L'innovation permet de développer des solutions de biocontrôle plus efficaces qu'actuellement. Ainsi, grâce aux évolutions de pratiques culturales (cultures intermédiaires…) et malgré le contexte climatique, le **rendement global** des productions alimentaires et non alimentaires progresse, pour atteindre 6,1 tonnes de matière sèche par hectare de SAU – tMS/haSAU – (contre 5,1 tMS/haSAU dans le tendanciel à l'horizon 2050).

L'élevage poursuit son évolution à la baisse mais avec des situations très contrastées, en ligne avec la baisse continue de la consommation de viande. Pour les cheptels bovins, deux orientations cohabitent : des systèmes qui accentuent leur part herbagée et extensive et des systèmes qui s'intensifient encore davantage, avec 10 % des cheptels demeurant non pâturants. Globalement, les cheptels bovins lait se réduisent, en partie du fait de l'évolution de la demande et d'une intensification accrue. Le bilan fourrager est à l'équilibre avec un surplus correct (surplus d'herbe de 19,5 Mt de MS). Les productions de porcs et volailles évoluent vers davantage de signes de qualité labéllisés, les productions très intensives sont amenées à disparaître à l'horizon 2050.

Dans ce scénario, **les usages énergétiques de la biomasse** pour différents secteurs (industrie, transports…) sont nettement plus élevés qu'aujourd'hui. De fait, pour répondre à cette demande, les productions à usages non alimentaires progressent, en particulier la méthanisation (135 TWh) et les cultures lignocellulosiques (49 TWh dont environ 50 % pour des biocarburants 2G). Le développement de la méthanisation, avec des unités de production de plus grande taille qu'en S1 et S2, permet un retour au sol

d'une part importante de digestats, qui couvrent un quart des apports totaux d'azote aux cultures. Une partie de ces digestats est exportée hors de leur région de production pour favoriser le bouclage des cycles sur une plus grande partie du territoire.

Ce scénario, par l'intensification des systèmes déjà en place, entraîne un **usage de l'eau** encore plus important (près de 3 Mdm³), pour des surfaces irriguées multipliées par 1,5. Les surfaces en maïs ensilage se maintiennent pour subvenir aux besoins des élevages intensifs. Les surfaces de fruits et légumes irriguées doublent par rapport à la valeur actuelle. Néanmoins, les besoins sont mieux répartis sur l'année, ce qui permet une baisse des usages d'eau en période estivale d'environ 20 % du fait de la diminution des surfaces cultivées de maïs.
Dans une stratégie de compétitivité et de spécialisation, la France continue à miser sur ses principales **exportations** en se spécialisant davantage sur les exports de produits de qualité (hormis le vin comme mentionné plus haut) et à importer les produits agricoles manquants. C'est le cas notamment des produits issus de l'agriculture biologique, pour lesquels la demande reste supérieure à l'offre. Le pays reste exportateur de viande de volailles. Par rapport à la situation actuelle, les soldes de viande bovine et de viande porcine s'améliorent. Le solde exportateur de céréales et celui du lait quant à eux diminuent. Le déficit en fruits et légumes est toujours présent mais il est moindre.

5.5. Scénario 4 : des leviers technologiques au service de filières productives et spécialisées

Dans ce scénario, **l'offre et la demande sont très peu contraintes** et s'inscrivent dans des évolutions en cours : les filières agricoles et agroalimentaires sont fortement spécialisées et compétitives. La principale évolution des régimes alimentaires repose sur l'inclusion, encore faible, de protéines alternatives (viande de synthèse, insectes…) remplaçant une part des produits carnés traditionnels, mais aussi ceux destinés à l'alimentation animale : volailles, aquaculture… Des évolutions mineures vers des régimes moins carnés se poursuivent. Ainsi, les terres agricoles sont très sollicitées, autant en surfaces qu'en modes de production, majoritairement intensifs. La SAU conserve une composition globalement similaire au tendanciel, mais recule de 2 Mha par rapport au niveau actuel, en raison de l'artificialisation continue des terres arables.

Les systèmes agricoles sont dominés par les systèmes conventionnels raisonnés (70 % des exploitations) basés sur une optimisation technique des systèmes actuels, tandis que les systèmes de type « production intégrée » et « bas intrants de synthèse » restent faibles (respectivement 20 % et 10 % des exploitations totales). La recherche d'optimisation technique et technologique est encore plus poussée que dans S3,

avec notamment un développement marqué de l'agriculture de précision, du biocontrôle et des solutions innovantes de protection des cultures ou encore de la génétique. Malgré les effets du changement climatique, ces innovations permettent de faire légèrement progresser le rendement global (+14 % par rapport au tendanciel à l'horizon 2050). La place des systèmes agroforestiers et des haies reste faible dans ce scénario (stabilisation au niveau actuel). Dans la mesure où la saisonnalité des productions n'est pas un critère fort de la demande alimentaire, les cultures sous serres chauffées progressent de 38 % par rapport au tendanciel à l'horizon 2050. Face à la poursuite de l'artificialisation des terres, l'innovation permet aussi de produire en milieu urbain ou périurbain près de 10 % des productions *via* une agriculture urbaine intensive technologique : serres sur les toits, cultures en sous-sol ou en containers…

Les cheptels de bovins viande se maintiennent, tandis que les bovins lait reculent, dans la mesure où la demande est satisfaite par une productivité accrue à 9 400 litres/tête (+65 % par rapport au S1 à l'horizon 2050 et +39 % par rapport à la situation actuelle), dans des systèmes intensifs, avec un tiers du cheptel en zéro pâturage et la quasi disparition des systèmes très pâturants. Le solde fourrager diminue en raison de surfaces moins étendues et d'une baisse du rendement. Du fait de l'évolution de la demande nationale et internationale, le nombre d'élevages de porcs diminue tandis que les élevages de volailles sont de plus en plus nombreux (principalement poulets standards et poules pondeuses). L'innovation dans les protéines alternatives est importante : l'entomoculture se développe en utilisant principalement des biodéchets et des coproduits agricoles et industriels, principalement pour l'alimentation animale, et représente près du quart des protéines consommées en élevages de volailles et poissons, mais aussi, ponctuellement, pour l'alimentation humaine. Les modèles qui se développent tentent de s'intégrer au mieux dans le tissu industriel existant afin de réduire leur empreinte énergétique notamment grâce à l'énergie de récupération, la valorisation de coproduits des industries agroalimentaires… L'aquaculture se développe fortement et produit ⅓ des poissons consommés en France, tout en réduisant l'impact que faisait peser sur la faune sauvage la surexploitation des ressources halieutiques. À l'approche de 2050, arrivent sur le marché les premières protéines animales de synthèse issues de cultures cellulaires ayant réussi le passage à l'échelle industrielle, ce qui permet de proposer une offre de produits ayant un aspect rappelant la viande (goût, texture…) à un prix abordable. Ces protéines de synthèse sont aussi intégrées dans les produits (ultra)transformés pour faciliter l'appétence des consommateurs pour ces produits et favoriser ainsi leur consommation.

Les productions à usages non alimentaires sont en hausse : le niveau de production de bioénergies liquides et gazeuses (hors forêt et produits bois dérivés) est la résultante d'une consommation de biomasses agricoles de 166 TWh. Les ressources méthanisées proviennent principalement de cultures intermédiaires (37 %), de résidus de culture (22 %) et d'effluents d'élevage (14 %). La production de biocarburants se développe, en s'appuyant principalement sur la technologie des biocarburants avancés et la valorisation de biomasses lignocellulosiques.

Ces systèmes de cultures ont recours à **l'irrigation** sur deux fois plus de surfaces qu'aujourd'hui et font un usage accru de l'eau, avec des volumes atteignant 4,5 Mdm^3, dont 42 % pour les cultures estivales.

Il n'y a pas d'objectif de relocalisation ni de substitution des produits agricoles et alimentaires : l'offre et la demande restent très décorrélées dans leurs évolutions, dans la mesure où les marchés mondiaux guident les flux de denrées. **Les soldes exportateurs** des principales productions (céréales, viande) augmentent un peu par rapport à la situation actuelle ; celui du lait baisse un peu. Globalement, le déficit en fruits et en légumes se maintient. Un déficit en tourteaux est toujours présent, en lien avec l'intensification d'une partie des élevages.

6. Comparaison des principales quantifications des scénarios

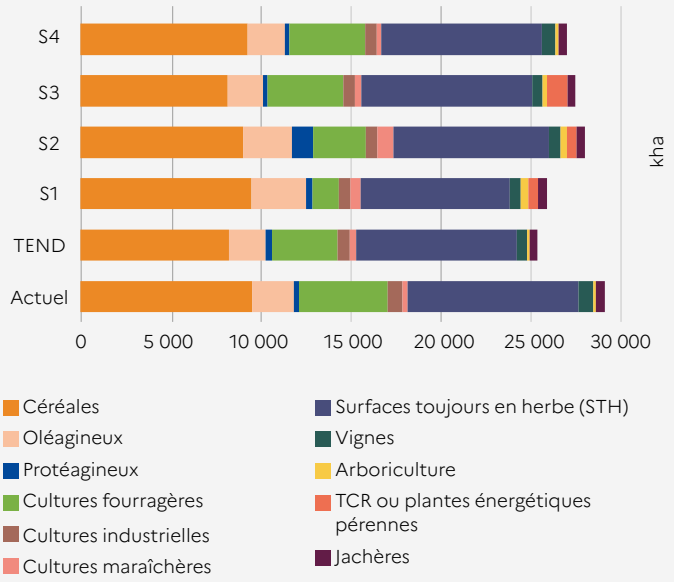
ÉVOLUTION DU SYSTÈME PRODUCTIF (SAU, CHEPTELS…)

De façon générale, les principes de l'agroécologie deviennent les standards dans les trois premiers scénarios, tandis que les modèles productifs actuels demeurent et s'intensifient dans S4 et le tendanciel. Les résultats ci-dessous (*Graphiques 5* à *11* et *Tableaux 4* et *5*) présentent la comparaison entre les différents scénarios.

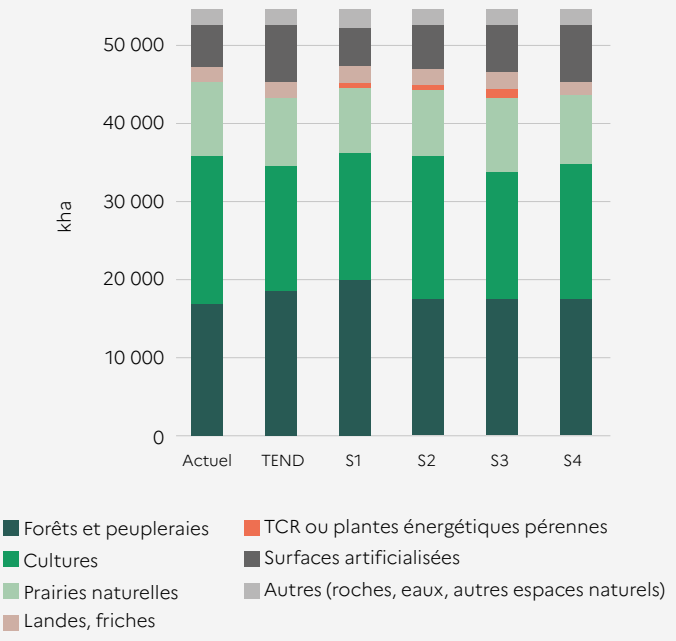
La SAU varie entre 24,6 Mha (équivalent au tendanciel) et 26,7 Mha. Elle est la plus élevée dans S2, et la plus faible dans S1, avec un développement marqué de la forêt pour ce dernier (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*). La surface de prairies est maintenue mais varie entre 8,1 et 9,3 Mha (surface actuelle) en fonction de l'évolution de la demande alimentaire et des types d'élevage.

L'évolution de l'usage des terres est représentée en *Graphique 6*. Le détail concernant la production forestière peut être consulté dans le chapitre dédié. Concernant les surfaces artificialisées, elles sont systématiquement réduites par rapport au scénario tendanciel. Les données représentées sont provisoires et basées sur des hypothèses de travail réalisées dans le cadre des simulations du secteur agricole. Ces données d'évolution de l'artificialisation des sols au sein des différents scénarios seront affinées dans le cadre d'un travail réalisé avec le CGDD et feront l'objet d'un document spécifique.

Graphique 5 Surface agricole utile dans chaque scénario à l'horizon 2050 et comparaison avec l'état actuel



Graphique 6 Usage des terres dans les différents scénarios[17]



TCR : Taillis courte rotation.

17 Les faibles écarts sur la valeur totale sont liés à de légères imprécisions du modèle utilisé.

Les plus fortes réductions des cheptels sont globalement observées dans S1, scénario où la baisse de la consommation alimentaire est la plus marquée et où la part des produits végétaux est la plus forte. Dans S1 et S2 principalement, les systèmes d'élevage tendent vers davantage d'extensivité, réduisant ainsi leur dépendance aux aliments importés et favorisant le maintien des praires et le stockage de carbone associé, ainsi que l'entretien des paysages (un focus sur l'évolution des types de conduite d'élevage des bovins lait est présenté en *Graphique 7*). Les évolutions des cheptels sont globalement moins défavorables dans S4, scénario dans lequel la consommation alimentaire est peu modifiée.

Graphique 7 *Répartition des différentes conduites d'élevage des bovins lait en France à l'horizon 2050*

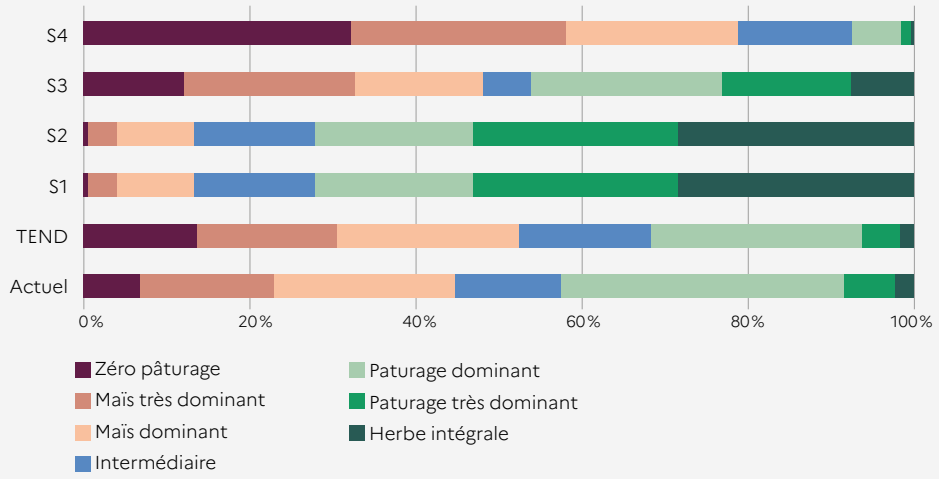


Tableau 4 *Évolution des cheptels dans les différents scénarios à 2050. Données actuelles en milliers de places ; données scénarios en % d'évolution à 2050 par rapport à la situation actuelle*

Cheptels	Actuel	TEND	S1	S2	S3	S4
Porcs charcutiers	7 152	- 43 %	- 65 %	- 53 %	- 40 %	- 39 %
Porcs en intensif	6 866	- 46 %	- 100 %	- 100 %	- 100 %	- 39 %
Poulets de chair	180 176	40 %	- 30 %	- 20 %	0 %	5 %
Poulets standards	122 520	24 %	- 100 %	- 100 %	- 71 %	45 %
Poules pondeuses	58 315	9 %	20 %	20 %	20 %	30 %
Chèvres	855	4 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Brebis lait	1 245	- 16 %	- 10 %	- 10 %	- 10 %	0 %
Brebis viande	3 379	- 75 %	- 10 %	- 10 %	10 %	0 %
Bovins lait	3 590	- 41 %	- 25 %	- 20 %	- 25 %	- 35 %
Bovins viande	4 119	- 5 %	- 85 %	- 60 %	- 25 %	2 %

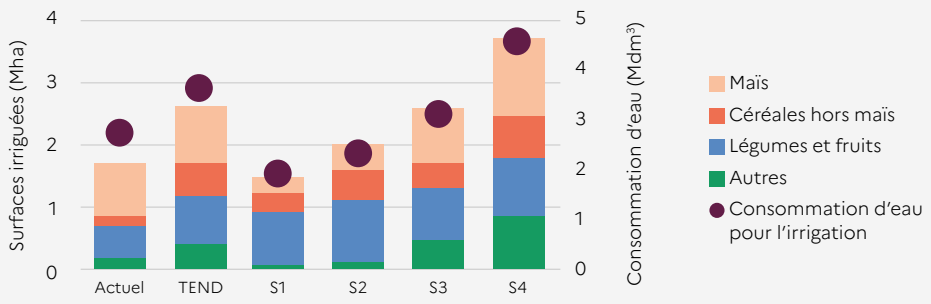
ÉVOLUTION DES USAGES MATIÈRE (EAU, FERTILISANTS…)

La consommation d'eau pour l'irrigation est croissante entre S1, S2, S3 et S4, en lien avec les surfaces de cultures irriguées comme le maïs et avec les objectifs de rendements dans les différents scénarios. Seuls S1 et S2 aboutissent à une réduction de la consommation d'eau par rapport à l'actuelle *(Graphique 8)*.

La part de l'azote minéral (fertilisant de synthèse) dans le total de l'azote apporté aux cultures est le plus faible dans S2, avec dans ce scénario un développement important des systèmes bas intrants de synthèse et production intégrée (qui couvrent à eux deux l'ensemble des systèmes – moitié chacun) et un fort développement des légumineuses, qui permettent la fixation symbiotique de l'azote. *A contrario*, c'est dans S4, scénario dans lequel l'agriculture conventionnelle reste prédominante, que la part de l'azote minéral est la plus élevée *(Graphique 9)*.

L'usage de produits phytosanitaires évolue de façon contrastée entre les scénarios *(Tableau 5)*, avec une forte baisse du nombre de traitements dans S1 et S2 principalement générée par des évolutions des systèmes agricoles. Dans le scénario tendanciel, S3 et S4, les systèmes de production évoluent moins et les leviers sont davantage technologiques (biotechnologies, agriculture de précision…).

Graphique 8 Usages de l'eau actuels et à l'horizon 2050 dans les différents scénarios (consommation et surfaces irriguées)



Graphique 9 Proportions des différentes sources d'azote apporté aux cultures actuellement et à l'horizon 2050

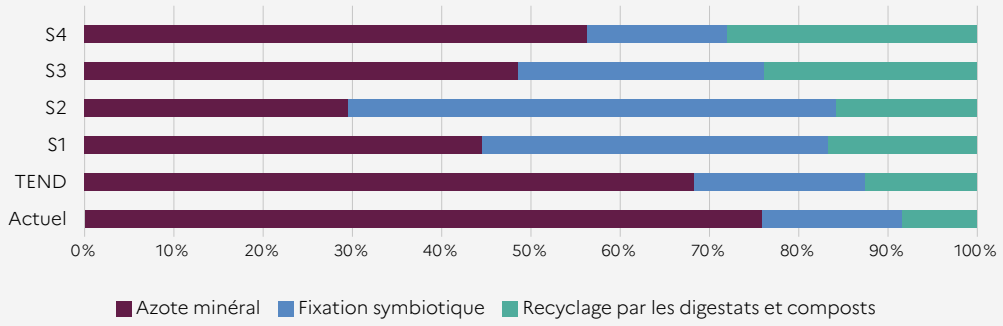


Tableau 5 Évolution de l'usage des produits phytosanitaires, exprimé en NODU[18]

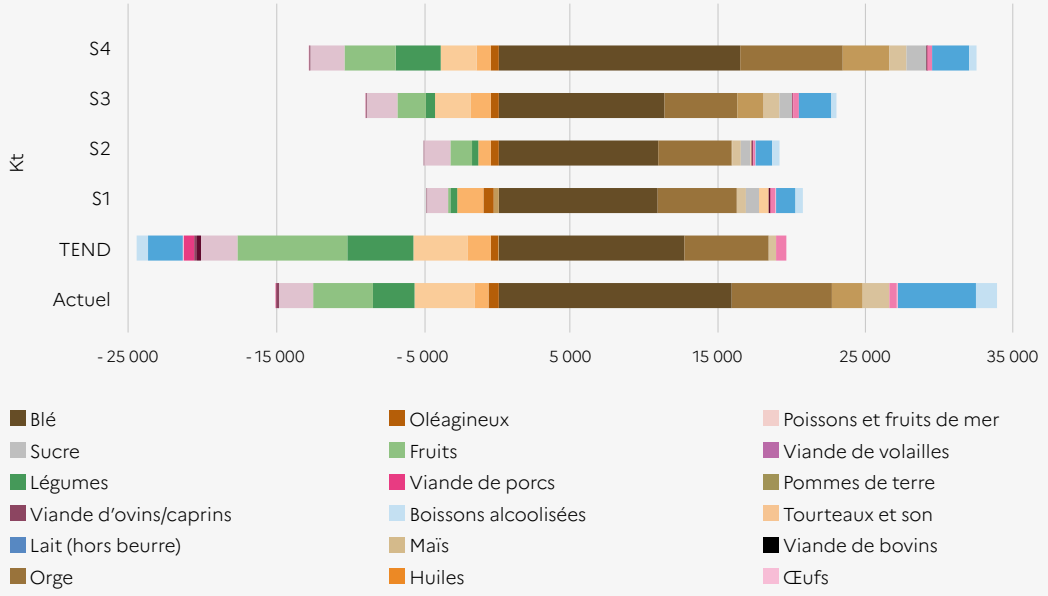
	Actuel	TEND	S1	S2	S3	S4
NODU (produits de synthèse) [Millions de doses]	14,6	9,7	1,7	3	5,7	9,7

18 NODU (Nombre de dose unité) : indicateur de suivi du recours aux produits phytopharmaceutiques du plan Ecophyto. L'objectif du plan Ecophyto II+ est une réduction de 50 % de cet indicateur à l'horizon 2025 par rapport à 2015. https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-nodu.

ÉVOLUTION DU SOLDE COMMERCIAL

En cohérence avec l'évolution des régimes (*i.e.* de la demande alimentaire), la France tend à renforcer son autonomie alimentaire, en particulier sur les fruits et légumes dans S1 et S2. Dans tous les cas, les filières actuellement fortement exportatrices (blé, orge) conservent un solde excédentaire, excepté pour le lait pour lequel la France devient déficitaire dans le scénario tendanciel en raison d'une forte réduction du cheptel qui ne s'est pas accompagnée d'une évolution similaire de la demande.

Graphique 10 Évolution du solde des principaux produits agricoles (solde = export - import)



ÉMISSIONS DE GES

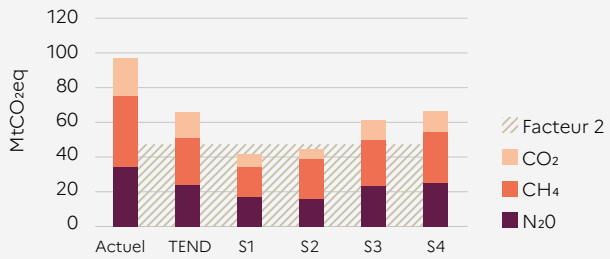
L'atteinte du facteur 2 dans le secteur agricole indiquée dans la SNBC 2 n'est possible que dans S1 et S2 (*Graphique 11*). Cela passe par la réduction importante des cheptels et de l'usage des intrants de synthèse, ainsi qu'un retour à davantage de saisonnalité dans la production des denrées alimentaires, qui nécessite notamment moins de serres chauffées.

L'évolution des systèmes de production agricole en lien avec l'évolution de la consommation alimentaire et les évolutions tendancielles du paysage agricole déjà observées, dont au global la baisse de l'élevage, est intégrée dans les différents scénarios. Néanmoins, des différences existent : dans S1 et S2, l'évolution est guidée par la demande, alors que dans S3 et S4, c'est l'offre qui guide l'évolution du secteur.

Ainsi, dans S1 et S2, parmi les leviers clés, on peut noter la forte progression des légumineuses, le développement des haies et de l'agroforesterie, une baisse plus marquée de l'élevage. Dans S3 et S4, au contraire, l'évolution du secteur se distingue par le développement de systèmes plus productifs en quantité de biomasse produites et en technologies et par un maintien plus important de l'élevage (dans une logique d'exportation), y compris par rapport au tendanciel. Il en résulte des réductions d'émissions de GES plus importantes dans S1 et S2 que dans S3 et S4. Ces derniers atteignent néanmoins des réductions un peu supérieures au scénario tendanciel.

La réduction du recours aux engrais de synthèse et un meilleur usage des ressources organiques émergent

Graphique 11 Émissions territoriales de GES actuelles et à l'horizon 2050 du secteur agricole



comme des enjeux communs à tous les scénarios. De la même façon, tous les scénarios nécessitent de mobiliser des ressources agricoles pour répondre à la demande en énergies renouvelables, notamment *via* le développement de la méthanisation agricole, même si les niveaux de production et de mobilisation des ressources diffèrent. C'est le cas en particulier des élevages dont la disponibilité varie en fonction de l'évolution des cheptels et du choix d'usage de ces matières organiques, de la mise en place de cultures énergétiques dédiées et/ou de la méthanisation des résidus de cultures.

ÉMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES

Afin de vérifier l'impact des scénarios sur la qualité de l'air, une analyse qualitative des évolutions des émissions de polluants liées aux différents scénarios a été réalisée par le CITEPA. Sur le secteur agricole, ce premier niveau d'analyse qualitative a été établi à partir des données d'activité projetées (cheptels, apport d'azote minéral total et par formes) ainsi que de l'évolution des pratiques agricoles. Il identifie l'ammoniac comme polluant principalement impacté par les hypothèses choisies. Même si les réductions d'émissions estimées par le CITEPA à l'horizon 2050 sont moins importantes que celles évaluées par l'ADEME (du fait d'écart de modélisations), **il paraît assez certain que les quatre scénarios à l'étude conduisent à une baisse des émissions de NH_3** et le classement des scénarios est identique avec, du moins émetteur au plus émetteur : S2 < S1 < S3 < S4.

Cette baisse des émissions de NH_3 attendue pour l'ensemble des scénarios est liée :

- pour les cheptels bovins au recul des cheptels qui compenserait en S3 et S4 les émissions supplémentaires en lien avec la hausse de productivité ;
- pour les cheptels porcins et volailles au déploiement des bonnes pratiques et à la réduction des effectifs ;
- pour la gestion des déjections au recul des cheptels et au déploiement des bonnes pratiques de stockage et de retour au sol ;
- pour la fertilisation minérale au recul de l'azote minéral total épandu, au recul des formes les plus émettrices et au déploiement des bonnes pratiques à l'épandage.

Dans les différents scénarios, le développement de la méthanisation hors déjections entraîne des émissions de NH_3 supplémentaires. Il faudra donc être vigilant sur les pratiques d'épandage associées aux digestats méthanisés et pousser le déploiement de bonnes pratiques.

Une évaluation quantitative ultérieure permettra de consolider ces premières conclusions.

INDICATEURS DE RÉSILIENCE

Si l'agriculture se doit de contribuer à l'atténuation du changement climatique, elle est tout aussi contrainte de faire face aux impacts du changement climatique, dont elle est, avec la forêt, l'un des secteurs les plus affectés. Quel que soit le scénario d'évolution des émissions de GES considéré à 2050, de nombreux impacts du phénomène sur le secteur sont à prendre en compte : l'augmentation moyenne des températures, la hausse de la concentration en CO_2 et autres composantes dans l'atmosphère, l'évolution du régime de précipitations, l'évolution des phénomènes extrêmes (inondations, canicule…) en nombre et en intensité.

Tous ces paramètres influent sur la production agricole en volume, en qualité et en variabilité et participent à accentuer la volatilité des prix des denrées agricoles. Ces impacts vont s'accentuer avec l'évolution du contexte lié au changement climatique.

Ainsi, il est nécessaire d'analyser la résilience et la robustesse des scénarios d'atténuation. Pour cela, une analyse qualitative couplée avec la production d'indicateurs quantitatifs de résilience et de sensibilité a été menée en première approche. Comportant des limites (par exemple, l'approche à l'échelle nationale ne permet pas de capter les complémentarités ou évolutions régionales), elle serait à approfondir ultérieurement pour une évaluation plus précise.

Les indicateurs de résilience et de vulnérabilité ont été produits à partir du modèle MoSUT de Solagro sur la base des simulations agricoles décrites précédemment. Ils sont regroupés selon plusieurs grandes familles de composantes de vulnérabilité :

- couverture et fertilité des sols ;
- dépendance à l'eau ;
- recours aux légumineuses ;
- ressources fourragères (ruminants) ;
- éléments arborés dans les agrosystèmes ;
- diversification des revenus.

Certains indicateurs visent à donner des indications directes ou indirectes sur la résilience du secteur vis-à-vis des impacts du changement climatique de façon directe ou indirecte : c'est le cas par exemple des éléments arborés dans les agrosystèmes ; d'autres traduisent au contraire la sensibilité et la fragilité du secteur aux impacts du phénomène. C'est le cas par exemple de la dépendance à l'eau.

N.B. **:** les indicateurs de la dépendance à l'eau considérés ici sont une première approche qu'il conviendrait d'affiner. Notamment, il conviendrait, au-delà des besoins en eau dans la période estivale pris en

compte dans l'analyse, de considérer également les besoins en eau au printemps et à l'automne, ceux-ci étant amenés à se développer avec le changement climatique.

Ainsi, la quantification des indicateurs pour chaque scénario permet une première analyse comparative des scénarios en termes de résilience/vulnérabilité vis-à-vis des impacts du changement climatique actuels et à venir, en listant un ensemble d'indicateurs de capacité d'adaptation des systèmes agricoles *(Tableau 6)*. Cette approche reste globale et indicative à ce stade.

Dans le cadre de travaux ultérieurs, il serait pertinent d'éprouver la méthode initiée ici et de la compléter avec des simulations prospectives régionalisées tenant compte des spécificités de chaque territoire.

Tableau 6 Indicateurs de vulnérabilité et de résilience au changement climatique dans les différents scénarios à 2050

Indicateurs de vulnérabilité	Actuel	TEND	S1	S2	S3	S4
DÉPENDANCE À L'EAU						
Superficie irriguée totale [Mha]	1,7	2,6	1,5	2	2,6	3,7
Part de la SAU irriguée [%]	6 %	10,3 %	5,8 %	7,2 %	9,5 %	13,8 %
Part de la surface irriguée en maïs grain [%]	50,2 %	34,3 %	15,6 %	20,8 %	33,8 %	33,2 %
Volumes d'eau total d'irrigation [Mdm³]	2,7	3,6	1,8	2,3	3,1	4,5
Volumes d'eau d'irrigation estivale [Mdm³]	1,8	1,7	0,4	0,8	1,4	1,9
Consommation d'eau d'irrigation estivale [%]	68,3 %	48,4 %	23,4 %	35,2 %	46,9 %	41,7 %
COUVERTURE DES SOLS						
Terres arables avec couverts végétaux [kha]	1 091,8	2 163,6	16 549,5	17 538,2	11 234	4 918,5
FERTILITÉ DES SOLS ET BIODIVERSITÉ						
Surfaces de terres arables en semis direct [kha]	363,9	1 547	519	8 284	8 055	10 164
Variation des stocks de carbone dans les sols de grandes cultures (0-30 cm) par rapport au tendanciel, tC/ha (hors haies et bandes agroforestières)*	-	-	+ 2	+ 5	+ 3	+ 1
NODU (produits de synthèse)	14,6	9,7	1,7	3	5,7	9,7
Part d'azote organique [%]	24 %	32 %	56 %	71 %	51 %	44 %
RECOURS AUX LÉGUMINEUSES						
Azote obtenu par fixation symbiotique [ktN]	387,7	441,3	990,5	1 555,5	859,9	475,8
RESSOURCES FOURRAGÈRES (RUMINANTS)						
Production fourragère issue du maïs et cultures [%]	23,2 %	19,5 %	8,2 %	8,9 %	18 %	23,6 %
Production fourragère issue de pâturage [%]	32,3 %	40,9 %	44,1 %	44,5 %	35,3 %	35,6 %
Part de la production fourragère issue des prairies permanentes et naturelles (stock) [%]	44,5 %	39,6 %	47,7 %	46,5 %	46,7 %	40,8 %
Bilans fourragers (surplus d'herbe) [ktMS]	15 093	10 952,9	10 572,5	13 717,2	19 554,2	11 977,5
LINÉAIRES DE HAIES ET D'AGROFORESTERIE DANS LES AGROSYSTÈMES						
Haies sur prairies et terres arables [Milliers de km]	500**	547	935	939	619	500**
Agroforesterie (terres arables, prairies et pré-vergers – 75 arbres/ha) [kha]	140***	232	595,7	1 499	1 212	232
DIVERSIFICATION DES REVENUS						
Production de bioénergies agricoles [TWh/an]	39	106,8	163,2	150,8	199,8	165,8

* La variation des stocks de carbone dans les sols est utilisée comme un proxy de celle des teneurs en matières organiques, composante majeure de la fertilité des sols agricoles.
** Ordre de grandeur basé sur les estimations de Pointereau (2006). Les estimations du linéaires de haies à l'échelle nationale sont lacunaires et pourront être précisées *via* le dispositif national de suivi des bocages.
*** Majoritairement sur prairies et pré-vergers.

Source : ADEME, Solagro, 2021 + estimations ADEME.

Sur la base de l'ensemble des indicateurs de résilience et de vulnérabilité précédents, **une caractérisation qualitative des scénarios est réalisée ci-dessous**, afin de dégager un niveau global de résilience ou, au contraire, de vulnérabilité au changement climatique pour chacun d'eux. Néanmoins, rappelons qu'il s'agit là d'une première approche et que des travaux ultérieurs seraient nécessaires pour l'affiner.

TEND – Le scénario tendanciel permet une amélioration des différents indicateurs de vulnérabilité, qui reste cependant trop restreinte pour limiter les impacts à venir du changement climatique.

S1 – Ce scénario propose des améliorations très significatives pour la plupart des indicateurs de vulnérabilité, y compris la dépendance à l'eau avec une diminution concomitante des surfaces irriguées et du volume total d'eau pour l'irrigation (- 78 % de la consommation d'eau estivale).

S2 – Les indicateurs de vulnérabilité offrent une lecture assez proche de celle du S1 (toutes les composantes sont concernées par des progrès). Toutefois, les différents curseurs vont souvent au-delà de ceux proposés par S1, lui conférant une plus grande cohérence pour faire face aux enjeux du changement climatique.

S3 – Ce scénario se démarque du scénario tendanciel par des indicateurs plus satisfaisants pour la plupart des composantes de vulnérabilité. Il est également plus « équilibré » que S4 sur l'ensemble des indicateurs. Malgré tout, ses enjeux principaux sont relatifs à la dépendance en eau avec une quantité d'eau supérieure à celle mobilisée dans la situation initiale. La diversification des revenus peut néanmoins être considérée comme un facteur de résilience et d'adaptation intéressant du point de vue de l'agriculteur mais les impacts en termes de capacité nourricière du territoire et la dépendance aux importations fragilisent la résilience du scénario.

S4 – Ce scénario propose des améliorations contrastées en matière de composantes de vulnérabilité : sa fragilité réside surtout sur les niveaux de production envisagés, impliquant une forte dépendance à la ressource hydrique et aux produits phytosanitaires, en plus du déploiement de nombreuses technologies. C'est le seul scénario où les stocks de carbone dans les sols poursuivent leur diminution.

7. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques

Les travaux actuels confirment et renforcent le rôle du secteur agricole dans l'atteinte des objectifs de neutralité carbone de la France. Bien que des actions isolées se développent déjà depuis plusieurs années, l'urgence de la situation et l'ampleur des changements à mettre en œuvre nécessitent une accélération des processus permettant la transition agroécologique des systèmes agricoles français. Face à l'ampleur de la transition nécessaire, le *Tableau 7* rassemble des propositions d'actions politiques qui pourraient être activées et/ou renforcées à cette fin. Il est suivi d'une synthèse des éléments incontournables à considérer pour espérer réussir cette transition d'ampleur.

Tableau 7 Récapitulation des politiques publiques les plus structurantes par scénario

	S1	S2	S3	S4
POLITIQUES DE SOUTIEN À L'AGRICULTURE ET DE MISE EN COHÉRENCE AVEC LES OBJECTIFS ENVIRONNEMENTAUX				
Renforcer la prise en compte des sols, du climat et de la biodiversité dans les aides de la PAC et autres aides publiques (davantage d'écoconditionnalité, paiements verts, plans d'investissements, aides à la conversion et au maintien) de façon à transformer les systèmes de production				
Bonus/malus sur les imports				
Créer un ministère commun « agriculture et environnement » (ex. : DEFRA en Angleterre)				
Politiques favorisant l'investissement et la prise de risques pour les agriculteurs s'engageant dans la transition agroécologique (garanties, fiscalité, assurances)				
Renforcer le suivi des pratiques favorables à la lutte contre le changement climatique et l'évaluation des politiques *ex ante* et *ex post* (ex. : enquêtes pratiques agricoles, inventaires nationaux d'émissions)				
ORGANISATION DU TERRITOIRE ET DES FILIÈRES				
Former/éduquer/sensibiliser l'ensemble des acteurs				
Soutenir l'innovation technologique (ex. : Investissements d'Avenir)				
Mettre en place des contrats territoriaux et aménager les marchés publics pour assurer un revenu aux agriculteurs sur des critères environnementaux				
Organiser une gouvernance agricole, alimentaire et foncière cohérente à l'échelle de chaque territoire (généralisation des PAT[19], mise en cohérence avec les stratégies foncières et politiques agricoles – PLU/SCoT…)				
Instaurer (par la réglementation) un dispositif de transparence aux acteurs agroalimentaires sur la traçabilité des produits et leurs impacts environnementaux				
Renforcer le volet environnemental dans l'ensemble des SIQO[20]				
Favoriser le développement des financements privés et les orienter vers les systèmes les plus vertueux (par exemple, *via* les paiements pour services environnementaux, les fonds d'investissement, la finance verte, les crédits carbone…)				
Sanctuariser le foncier agricole lors de départs à la retraite				
À L'ÉCHELLE DES EXPLOITATIONS				
Incitations et aides à la reprise des exploitations en agroécologie et/ou à la reconversion (ex. : bonus/malus)				
Bonus/malus sur les pratiques agricoles et l'utilisation d'intrants, en lien avec leurs émissions de GES (taxes azote, GES… à réaffecter sur les bonnes pratiques)				

19 Projets alimentaires territoriaux.
20 Signes d'identification de qualité et d'origine.

Certains leviers sont incontournables pour permettre une évolution des systèmes productifs pour une contribution efficace du secteur agricole à l'atteinte de la neutralité carbone :

- **agir de façon couplée sur l'offre et la demande agricoles et alimentaires**, en cohérence avec les différents axes d'une bioéconomie durable. L'ensemble des résultats confirme qu'il ne peut y avoir de transformation agricole sans transition alimentaire et transition énergétique concertées, et qu'il serait nécessaire de passer d'une politique agricole commune à une politique agricole, alimentaire et énergétique commune cohérente avec les enjeux climatiques ;

- **protéger la ressource sols**, en favorisant des pratiques permettant un maintien et/ou une amélioration de la qualité multifonctionnelle des sols, en particulier dans les trois premiers scénarios. Cela impliquera une mise à jour et une mise en action de la stratégie nationale de gestion durable des sols initiée en 2015. Ce sujet sera en particulier développé dans un rapport dédié à la question de l'usage des terres et de la qualité des sols, prévu pour début 2022 ;

- **réduire les cheptels et renforcer la durabilité des productions maintenues**, en ligne avec l'évolution des régimes alimentaires. En produisant et en consommant autrement, les évolutions proposées devront viser à protéger la santé humaine, les animaux (conditions d'élevage…) et la viabilité des filières futures, tout en conservant les traditions gastronomiques, territoriales et agricoles françaises ;

- **renforcer le développement des projets alimentaires territoriaux** et diversifier les productions pour renforcer la résilience des territoires face aux aléas climatiques et internationaux ;

- **adopter une politique cohérente** aux frontières (avec un risque de concurrence internationale si le reste du monde ne suit pas la même trajectoire) et sur le territoire (soutien à la transition…), au risque d'affaiblir la compétitivité des filières. Cela pourrait par exemple passer par un meilleur respect de l'Accord de Paris et une limitation, voire une interdiction d'import de cultures qui participent à la déforestation ;

- **rendre plus cohérentes les politiques** structurantes du secteur agricole (directive nitrates, NEC[21]…) ;

- **évaluer localement** la disponibilité actuelle et future en eau ;

- **évaluer localement** les impacts potentiels du changement climatique.

21 *National Emission Ceiling* ou Plafonds d'Émission Nationaux en français.

TRANSVERSALITÉ

Les productions agricoles ne représentent qu'un usage des terres possible, à considérer en étroite relation avec les autres usages (espaces naturels, sylviculture, activités humaines d'industrie, de production énergétique, de loisir, d'habitat) et en cohérence avec les multiples usages possibles des biomasses produites : stockage de carbone, alimentation, énergie dont chaleur, transport, construction… Il conviendra de lire les chapitres associés à ces différents secteurs de la demande pour comprendre la cohérence globale des scénarios proposés, en particulier le chapitre *2.1.4. Alimentation* et *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* dans lequel les flux des différentes ressources biologiques sont décrits.

TEMPORALITÉ DES DÉCISIONS STRUCTURANTES

Au travers des quatre chemins contrastés d'évolution des modèles agricoles, les travaux présentés dans ce chapitre permettent d'apporter des éléments factuels qui pourraient aider les acteurs économiques des filières concernées à envisager des actions de moyen/long terme, au-delà des réflexions économiques qu'ils mènent habituellement en vue d'assurer leur viabilité sur un plus court terme. C'est notamment le cas de S1 et S2. En effet, l'ampleur des enjeux auxquels les acteurs doivent faire face nécessite d'intégrer des transformations plus structurelles des systèmes aux évolutions de leurs pratiques. Leur mise en œuvre implique une anticipation des évolutions à orchestrer dans le temps, à articuler avec divers accompagnements des acteurs. Pour assurer la pérennité des systèmes, il est indispensable de prendre en compte la temporalité des solutions à mettre en œuvre selon leur degré d'impact sur l'évolution des systèmes : **« Se préparer aujourd'hui pour être prêt demain. »**

« Se préparer aujourd'hui pour être prêt demain. »

Tout comme dans les autres secteurs, il est important d'avoir une lecture attentive des scénarios fortement dépendants de solutions technologiques innovantes (principalement S4, mais aussi S3). En effet, le temps nécessaire à ces innovations pour atteindre la maturité industrielle n'est pas connu aujourd'hui (viandes de synthèse par exemple). Le risque de voir se développer ces solutions trop tardivement au regard de l'urgence de l'enjeu climatique doit donc être pris en compte pour évaluer la pertinence de ces modèles. En outre, même s'il est moins important pour l'agriculture que pour d'autres secteurs jouant sur l'effet de substitution énergétique, le risque de reporter les impacts ou efforts sur d'autres secteurs implique de toujours regarder et mettre en perspective l'ensemble des trajectoires de neutralité carbone, pour tous les secteurs et pas seulement sur un secteur donné.

8. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives de travail

Le secteur agricole est à la croisée de nombreux enjeux environnementaux (les émissions de GES, la qualité des sols, la gestion de l'eau, la biodiversité, le bien-être animal…), économiques et sociaux (la viabilité et la compétitivité des filières, l'emploi et les revenus dans le secteur et les filières, la sécurité alimentaire [tant qualitative que quantitative], la souveraineté alimentaire, etc.). Les simulations réalisées dans ce projet n'ont abordé que partiellement ces différents enjeux et comportent des limites qui constituent autant de pistes possibles pour des approfondissements ultérieurs, comme synthétisé dans le *Tableau 8*.

Tableau 8 Synthèse de plusieurs pistes d'approfondissement

	ENJEUX CLÉS
Environnement	
Adaptation au changement climatique	Meilleure connaissance des impacts sur l'agriculture française et sa capacité de résilience à l'horizon 2050 et au-delà Territorialisation des impacts et des réponses à apporter Évolutions transformatives à imaginer (ex. : nouvelles productions, délocalisations des zones de production)
Biodiversité et écosystèmes	Quantification des impacts Intégration du lien avec le changement climatique Meilleur quantification de l'impact sur la qualité/santé des sols
Ressource en eau	Pollution de l'eau Quantité d'eau disponible et consommée Provenance de l'eau Impacts sur les milieux aquatiques Répartition et optimisation des usages
Économique et social	
Emplois et revenus	Préservation des emplois Transformation des emplois Maintien des revenus Accompagnement des acteurs Sécurité et souveraineté alimentaire
Rôle du secteur privé	Synergies entre les maillons Répartition de la chaîne des valeurs
Autres	
Progrès technologique, technique et génétique	Développement, maturité des technologies Impacts environnementaux, économiques et sociaux Blockchain
Régionalisation	Impacts et évolutions en région

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Une première analyse a été menée avec des éléments d'analyse à la fois qualitatifs et quantitatifs pour appréhender la résilience et la sensibilité des quatre scénarios au changement climatique dans l'agriculture. Néanmoins, l'étude des impacts du changement climatique sur le secteur agricole en France et les systèmes agricoles les plus résilients doit être approfondie, notamment sur la base de références à capitaliser et en confortant la méthode initiée. Une analyse territorialisée sur le sujet semble également indispensable pour prendre en compte les contextes climatiques, hydrologiques et agricoles. Un travail spécifique sur les sols à une échelle régionale sera réalisé dans les Hauts-de-France et publié en 2022. Autres pistes possibles d'investigation sur le sujet de l'adaptation : l'abandon de certaines cultures et la production de nouvelles cultures sur du moyen terme et selon les régions, non étudiées dans le cadre de l'exercice actuel, sont des questions intéressantes à creuser dans le cadre de travaux ultérieurs.

BIODIVERSITÉ ET ÉCOSYSTÈMES

Aucun chiffrage précis n'a été réalisé sur les impacts des systèmes et pratiques agricoles envisagés. Des discussions sont en cours avec l'Office Français pour la Biodiversité à la date de rédaction de ce rapport. En première approche, nous pouvons estimer que la diminution d'une partie des élevages, le développement de cultures énergétiques lignocellulosiques ou encore le maintien des produits phytosanitaires et de certaines pratiques agricoles, telles que le labour profond, auront un impact négatif sur la biodiversité locale. *A contrario*, la diversification des systèmes culturaux à l'échelle de l'exploitation et des territoires ou encore le développement des systèmes agroforestiers et du linéaire de haies seront des leviers favorables au maintien, voire à l'amélioration de l'impact des activités agricoles sur la biodiversité terrestre. Quoi qu'il en soit, il est indispensable de considérer biodiversité et changement climatique comme faisant partie d'une même problématique complexe pour s'assurer que les solutions envisagées sur les modèles agricoles, notamment, aient un potentiel maximal d'amélioration du système global [23]. Il est néanmoins probable que des arbitrages doivent parfois être réalisés entre priorités.

RESSOURCE EN EAU

La question de l'usage de l'eau et les impacts de chaque scénario sur la ressource et les milieux aquatiques n'ont pas pu être étudiés de manière approfondie. Néanmoins des premières réflexions ont été initiées avec les Agences de l'eau Adour-Garonne et Seine-Normandie et des travaux ultérieurs seront nécessaires pour approfondir ce sujet stratégique.

L'eau est une ressource indispensable pour les activités agricoles, en particulier pour l'alimentation des animaux élevés dans les exploitations et la croissance des plantes cultivées. Pour ces dernières, le recours à l'irrigation peut permettre en dernier recours de pallier des précipitations parfois insuffisantes à des moments clés de la croissance des végétaux [24].

Ainsi, les choix des assolements, systèmes et pratiques agricoles ont des impacts potentiellement significatifs sur les **milieux aquatiques, la ressource en eau et ses usages**, avec plus particulièrement trois axes à investiguer :

- **pollutions diffuses agricoles** comme les nitrates, produits phytosanitaires, phosphore… ;
- **impact sur les milieux aquatiques**, en particulier du fait de l'érosion des sols mais aussi des effets sur l'hydromorphologie, la ripisylve, le colmatage des fonds de cours d'eau ou encore la suppression des zones d'expansion de crue… ;
- **quantité consommée** et provenance de la ressource.

Or, les questions de quantité et de qualité de l'eau se posent dans un contexte de raréfaction de la ressource, d'augmentation des demandes liées au changement climatique et des conflits d'usages. En agriculture, à pratiques constantes, la demande en eau se développe du fait d'une augmentation de l'évapotranspiration potentielle. Cette évolution est différente selon le choix des cultures, des variétés, la réserve utile du sol et autres pratiques et systèmes permettant de limiter cette demande (haies coupe-vent, agroforesterie…). Cela concerne des cultures déjà irriguées aujourd'hui mais aussi des cultures pour lesquelles l'irrigation pourrait devenir nécessaire malgré le déploiement de stratégies de sobriété [25].

Une large concertation a été organisée en 2018-2019 pour faire émerger des solutions concrètes pour répondre aux défis de la gestion de l'eau avec l'ensemble des acteurs concernés. Ces Assises de l'eau ont fait émerger trois objectifs prioritaires : protéger les captages d'eau potable notamment des pollutions d'origine agricole, économiser la ressource avec un objectif d'une baisse des prélèvements de 25 % en 15 ans, mieux partager l'eau et préserver les rivières et milieux humides.

De manière globale, pour pallier les situations de déficit de la ressource en eau, il est donc indispensable d'accompagner les acteurs dans une stratégie d'accroissement de la résilience des territoires en jouant sur la demande [26], l'offre étant amenée à être réduite d'après les projections (augmentation de l'évapotranspiration, modification des régimes hydriques…):

- **la gestion par la demande** vise la diminution de la consommation de l'eau par les économies qui constituent ici l'axe central de l'action ;
- **la gestion de la ressource par l'offre** s'appuie sur une mobilisation accrue de la ressource en eau par exemple *via* des retenues d'eau et sur une évolution de la répartition de cette ressource entre les différents secteurs consommateurs : usages agricoles, individuels, récréatifs, industriels, etc. ;
- divers experts du sujet [27] soulignent **l'importance de prioriser la gestion par la demande**, celle par l'offre comportant des limites [28] : en effet, la création de retenues réduit la disponibilité de la ressource pour les milieux avec le risque de ne pas inciter à la sobriété et accroît les sécheresses au niveau du bassin versant.

Par ailleurs, la question des sécheresses (météorologiques, hydrologiques et édaphiques) ne doit pas se limiter à une gestion de crise mais intégrer des **changements de comportements** significatifs partagés par les acteurs, avec des usages plus sobres en eau. L'adaptation au changement climatique, avec au cœur la question de l'eau, doit s'inscrire dans des stratégies de long terme incluant, lorsque c'est nécessaire, des changements systémiques. Le recours à l'irrigation devrait arriver en dernier ressort, après avoir mis en place l'ensemble des stratégies permettant plus de sobriété.

Dans le secteur agricole, diverses concertations d'acteurs [26] sur la question de l'eau mettent notamment en avant les solutions fondées sur la nature et le développement des pratiques agroécologiques avec un choix de cultures et/ou de variétés qui s'opère en fonction des conditions pédoclimatiques locales sur une gestion des sols adaptée à la préservation de la ressource favorisant la réserve utile et réduisant les ruissellements, l'érosion et l'évapotranspiration : restitution des résidus de récolte, couverture systématique du sol, haies…, ainsi que sur le développement des systèmes agroforestiers avec des atouts divers de la présence des arbres pour la ressource en eau.

Ainsi, le recours à l'irrigation et la mise en place de retenues de substitution ou de transferts interbassin ne pourront être envisagés qu'une fois la mise en place de pratiques et de systèmes de production limitant la demande en eau. Renforcer la résilience de l'agriculture face au changement climatique passera successivement par une combinaison de mesures à mettre en place, par une approche territorialisée et par un portage collectif.

EMPLOIS ET REVENUS DANS LES SECTEURS AGRICOLE ET AGROALIMENTAIRE

Sur les **plans économiques et sociaux**, la transition du secteur agricole pour l'atténuation du changement climatique s'accompagne évidemment d'évolutions économiques et sociales qu'il convient d'appréhender en vue d'une transition durable et viable. Le sujet est néanmoins complexe et les méthodes d'évaluation de ces impacts sont en cours de construction. Ainsi, les premières réflexions menées ne sont pas à ce stade suffisantes pour conclure, mais elles visent à apporter quelques éclairages. D'une part, pour avancer sur l'appréhension de ces enjeux, **l'ADEME réalise à la date de rédaction de ce document une étude prospective des filières protéines végétales et animales** qui fera l'objet d'un feuilleton publié en janvier 2022 : l'objectif est de mieux comprendre les conditions de la transition pour ces filières. D'autre part, une récente étude menée par l'IDDRI et le BASIC s'est intéressée aux conditions d'une transition juste de deux sous-secteurs agricoles, les bovins lait et les grandes cultures, à l'horizon 2030, dans le cadre du scénario de transition de la SNBC [29]. Pour cela, les impacts sur les emplois agricoles, dans les industries agroalimentaires et sur les revenus agricoles ont été évalués en considérant ce scénario dans les deux configurations différentes décrites ci-dessous à savoir « France duale » et « Recompositions socio-territoriales ».

En résumé, on peut mettre en évidence plusieurs résultats de cette étude de l'IDDRI et du BASIC (*N.B.* : le terme « tendanciel » correspond ici au scénario de l'étude IDDRI et non ADEME) :

- **dans la configuration « France duale » axée sur « une décarbonation sous contrainte de compétitivité-prix »**, le cadre d'action est axé sur l'offre et la compétitivité des filières. Les enjeux climat dominent, laissant peu de place aux enjeux santé et biodiversité, et accentuent « la prééminence de l'intensification "durable" de la production agricole comme solution principale ». L'analyse menée conclut à des impacts défavorables sur l'emploi, avec plus particulièrement une perte d'emplois agricoles de 10 % par rapport au scénario tendanciel en 2050 en raison de « la poursuite des logiques de concentration et d'une augmentation de l'intensité capitalistique des fermes ». On note également des pertes d'emplois dans les IAA (12 % de l'emploi actuel) et un risque de pertes sur les revenus agricoles ;

- dans la configuration « Recompositions socio-territoriales », le cadre d'action prend en charge de manière ambitieuse les enjeux climatiques mais aussi les questions de santé-nutrition et de biodiversité en s'appuyant notamment sur la diversification des systèmes et paysages agricoles, la diversification de l'alimentation avec une diminution marquée des protéines animales et une part faible des produits transformés dans l'alimentation. L'étude conclut que cette configuration peut permettre, sous conditions sociales et politiques particulières, une transition juste avec un emploi agricole supérieur de 10 % par rapport à celui du scénario tendanciel, un maintien du revenu agricole « sans contraintes majeures pour les niveaux de subventions ou les prix payés aux producteurs » et une augmentation de l'emploi dans les IAA.

L'étude souligne que les conditions sociales et politiques nécessaires à une transition juste sont nombreuses, notamment :

- l'organisation des marchés et la structuration de l'offre avec un « double défi de la convergence internationale et de la compétitivité » ;

- la convergence des visions entre États membres de l'Union européenne, pour que la mise en œuvre des plans stratégiques nationaux dans le cadre de la politique agricole commune fixe aux producteurs des objectifs et des conditions de production comparables ;

- la structuration d'une offre vertueuse notamment par le développement de paiements pour services écosystémiques couvrant l'ensemble des enjeux environnementaux dans une logique multifonctionnelle comme la contribution des exploitations à la séquestration de carbone ou la mise en place d'infrastructures agroécologiques sur la ferme ;

- sur le volet de l'alimentation, le déploiement et l'accompagnement des changements de comportements alimentaires en partie déjà initiés, comme le montrent certains signaux faibles : développement de la part de l'AB dans la consommation, diminution de la consommation de protéines animales, avec une attention particulière portée à l'accompagnement des ménages les plus modestes afin de permettre un accès élargi à une alimentation saine et durable ; l'amélioration de l'information du consommateur sur les produits alimentaires, l'accélération de l'évolution de la restauration collective, le déploiement de normes nutritionnelles et sanitaires rigoureuses pour limiter la consommation de produits ultratransformés… ;

- le soutien des industries agroalimentaires pour consolider un tissu d'entreprises de taille « moyenne » (20-49 et 50-249 employés) capables à la fois de produire des aliments différenciés en lien avec les territoires, mais également avec des coûts de production maîtrisés donnant accès à un marché large, etc. ;

- l'implication des collectivités locales dans la structuration des dynamiques territoriales.

À noter que les différents résultats de l'étude restent à confirmer *via* l'application de la méthode et de l'analyse menées sur d'autres sous-secteurs de la production agricole. Le travail est en cours de réalisation par l'IDDRI, le BASIC et leurs partenaires à la date de rédaction de ce document.

RÔLE DU SECTEUR PRIVÉ

Le secteur privé a un rôle majeur à jouer dans l'ensemble des scénarios. Celui-ci pourra varier en fonction des scénarios : amélioration des cahiers des charges et soutien à la transition des filières *via* des contrats longue durée avec les agriculteurs, redistribution de la valeur, transparence sur la qualité des produits par exemple, *via* un développement accru de l'usage des blockchains afin de mettre en place des registres transparents et infalsifiables [30] et par l'affichage environnemental des denrées, le soutien à l'innovation, l'acquisition de données environnementales…

PROGRÈS TECHNOLOGIQUES, TECHNIQUES ET GÉNÉTIQUES

La transition du secteur agricole dans S3 et S4 s'appuie sur une évolution marquée du progrès technologique, technique et génétique dans le secteur. Est notamment concerné le développement de l'agriculture de précision, des biocontrôles, des protéines alternatives (insectes, cultures cellulaires…) ou de l'agriculture urbaine intensive. Cependant, ces filières sont à des degrés de maturité différents. Certaines, telles que les cultures cellulaires, n'ont pas encore fait la preuve d'une production industrielle économiquement rentable ; d'autres, comme la production d'insectes ou l'agriculture urbaine intensive, n'ont pas prouvé leur capacité à se substituer efficacement aux méthodes actuelles. Ces filières innovantes manquent encore d'analyses d'impacts environnementaux solides pour juger de leur pertinence. Se pose également la question des impacts sur les filières existantes d'un point de vue économique et celle des conditions de diffusion, notamment sociales, de ces nouvelles productions. Par ailleurs, S4 prévoit le développement potentiel des OGM pour pallier les pertes de rendements associées à l'évolution du climat et des pressions parasitaires. Pourtant, la défiance envers ces technologies encore interdites sur le territoire reste élevée au sein de la population. Selon l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, environ 40 % des personnes interrogées n'ont pas confiance dans les autorités françaises pour leurs actions de protection des personnes dans le domaine des OGM [31].

RÉGIONALISATION DES SCÉNARIOS

La question de la régionalisation de l'ensemble de ces hypothèses, et plus particulièrement de la reterritorialisation poussée proposée dans S2, doit impérativement être approfondie pour permettre un passage à l'action cohérent avec les contraintes inhérentes à chaque territoire. Ce travail a été initié dans certaines régions et devrait se poursuivre sur l'ensemble du territoire, y compris les DOM-COM qui sont hors périmètre de cette prospective. Sur la base des travaux présentés dans ce rapport, plusieurs points saillants sont à prendre en compte :

- **des innovations organisationnelles devraient être envisagées**, notamment en imaginant des réarticulations entre zones urbaines et zones rurales dans les flux agricoles : protection des ceintures arables de qualité, développement des circuits courts de transformation et distribution… Un tel travail a été initié en région Provence-Alpes-Côte d'Azur autour d'une vision prospective contrastée de l'évolution du système alimentaire régional ;
- **une réflexion devrait être menée sur les relations internationales**, plus particulièrement sur les pays limitrophes à la France. En effet, pour optimiser les notions de production locale et de saisonnalité des productions en général, elles devraient être envisagées en termes de proximité géographique et pédoclimatique, au-delà des frontières existantes : par exemple, les bassins de production du nord de l'Espagne restent plus ou moins « locaux » pour une distribution dans une partie du Sud-Ouest de la France.

L'impact des modèles agricoles proposés sur l'usage des terres et la qualité des sols (érosion, pollution, capacité à stocker du carbone, à filtrer l'eau…) est central et sera abordé dans un feuilleton dédié à ce sujet.

9. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **Cour des comptes européenne**, *Politique agricole commune et climat – La moitié des dépenses de l'UE liées au climat relèvent de la PAC, mais les émissions d'origine agricole ne diminuent pas*, Rapport spécial n° 16, 2021.

[2] https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-lagroecologie.

[3] **Anaïs Tibi *et al.***, *Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire, Rapport de synthèse de l'étude*, INRAE (France), 2021, 159 pages.

[4] **Sylvain Marsac *et al.***, *Optimisation de la mobilisation de CIVE pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation*, ADEME, 2019, 73 pages.

[5] **CITEPA**, *Inventaire SECTEN (format « plan Climat »). Champ : France métropolitaine, DROM et Saint-Martin (périmètre Kyoto)*, 2017, *in* « Chiffres clés Climat, air, énergie », ADEME, 2018.

[6] **Sylvain Pellerin *et al.***, *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*, Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 2013, 92 pages.

[7] **MAAF**, *4 pour 1 000 : les sols pour la sécurité alimentaire et le climat*, 2015.

[8] **Priyadarshi R. Shukla *et al***, Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems, 2019.

[9] **ADEME, I Care & Consult, Blézat consulting, CERFrance, Céréopa**, *Agriculture et énergies renouvelables : état de l'art et opportunités pour les exploitations agricoles*, 2017, 70 pages.

[10] **Sylvain Pellerin *et al.***, *Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ?*, Synthèse du rapport d'étude, ADEME, 2019, 114 pages, ffhal-02284521f.

[11] **Laure Bamière *et al.***, *Analyse des freins et des mesures de déploiement des actions d'atténuation à coût négatif dans le secteur agricole : couplage de modélisation économique et d'enquêtes de terrain*, Rapport final, 2017, 79 pages.

[12] **John P. Reganold, Jonathan M. Watcher**, *Organic agriculture in the twenty-first century. Nature plants*, 2016, 8 pages.

[13] **Agence BIO**, *La Consommation bio en hausse en 2019 stimule la production et la structuration des filières françaises. Les chiffres 2019 du secteur bio*, Dossier de presse, 9 juillet 2020.

[14] **Céréopa**, *La Protéine dans tous ses états. Rapport sur l'indépendance protéique de l'élevage français*, 2017, 31 pages.

[15] **Carine Barbier *et al.***, *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation. Partie 2 : empreintes des importations agricoles et alimentaires françaises*, ADEME, 2020, 35 pages.

[16] **Observatoire National des Ressources en Biomasse**, *Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en France*, édition 2020.

[17] **ADEME**, *Marchés actuels des produits biosourcés et évolutions à horizons 2020 et 2030*, 2015, 18 pages.

[18] **ADEME, Solagro, CTIFL, ASTREDHOR, Arvalis, FNCUMA, IDELE, IFIP, ITAVI**, *Agriculture et efficacité énergétique : propositions et recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique de l'agriculture des exploitations agricoles en France*, 2018, 85 pages.

[19] **MAAF,** *Plan protéines végétales pour la France 2014-2020*, 2014, 24 pages.

[20] **Solagro *et al.***, *Facteur 4. Agriculture Forêt*, Rapport final, 2011.

[21] **Solagro *et al.***, *Afterres2050 : les déclinaisons régionales*, Rapport final, 2016.

[22] **FranceAgriMer**, *Vin et spiritueux, commerce extérieur. Bilan 2020*, 2020.

[23] **IPBES/IPCC**, Workshop Report on Biodiversity and Climate Change, 10 juin 2021.

[24] https://www.eaufrance.fr/lagriculture.

[25] **Nadine Brisson, Frédéric Levrault** (éd.), *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010)*, ADEME, 2010, 336 pages.

[26] **Juliette Aspar**, *Pratiques et systèmes agricoles résilients en condition de sécheresse. Quels leviers agroécologiques pour les agriculteurs du bassin Seine-Normandie ?*, Rapport de stage, AgroParisTech, AESN, 2019, 66 pages.

[27] *Avis du conseil scientifique du comité de bassin Seine-Normandie sur l'évolution des sécheresses et des risques associés dans les prochaines décennies* (présenté au comité de bassin le 10 octobre 2019) (http://www.eau-seine-normandie.fr/sites/public_file/inline-files/AvisCS_Risques_secheresse_10octobre2019_CB.pdf).

[28] **Séminaire SDAGE,** Gestion quantitative et sécheresse Piloté par la COMINA, jeudi 16 janvier 2020, Assises de l'eau.

[29] **Pierre-Marie Aubert *et al.***, *Vers une transition juste des systèmes alimentaires, enjeux et leviers politiques pour la France*, IDDRI, 2021.

[30] **CEP**, *Les Perspectives offertes par la blockchain en agriculture et agroalimentaire*, Analyse n° 140, juillet 2019, 4 pages.

[31] **IRSN**, *Baromètre 2020. La perception des risques et de la sécurité par les Français*, 2020.

10. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2020	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Surface agricole utile [Milliers ha]	28 778,55	25 101,70	25 636,28	27 712,14	27 164,19	26 695,25
Surface toujours en herbe [Milliers ha]	9 317,39	8 753,09	8 139,14	8 466,17	9 317,39	8 750,57
Surface prairies temporaires [Milliers ha]	2 800,58	1 924,74	588,65	843,23	1 980,38	2 340,83
Surfaces grandes cultures (céréales, oléoprotéagineux et cultures fourragères) [Milliers ha]	16 766,66	14 015	14 086	15 560	14 328	15 521
Fixation symbiotique de l'azote par légumineuses [Milliers de tonnes d'azote]	338	441,30	990,50	1 555,50	859,90	475,80
Consommation d'azote minéral [Milliers de tonnes d'azote]	1 874	1 564,30	1 132,60	836,60	1 513,20	1 710,40
Part d'azote organique (fixation symbiotique, digestats et composts) [%]	24	24,10	31,60	55,50	70,50	51,40
Rendements blé tendre [Tonnes par ha]	6,80	6,78	5,11	4,96	6,66	7,45
Nombre de places porcs (charcutier et intensif) [Milliers de places]	7 152	4 061	2 503	3 361	4 291	4 362
Productivité laitière [Milliers de litres de lait/an/vache]	6,80	8,26	5,70	5,70	7,01	9,38
Cheptel bovin lait – mères [Milliers de têtes]	3 590	2 106,99	2 692,42	2 871,91	2 692,42	2 333,43
Cheptel bovin viande – mères [Milliers de têtes]	4 119	3 895,64	617,79	1 647,45	3 088,96	4 200,99
Volaille de chair [Millions de places]	180,20	252,59	126,12	144,14	180,18	189,18
Volaille pondeuse [Millions de places]	58,30	63,74	69,98	69,98	69,98	75,81
Cultures fourragères [Milliers ha]	4 852	3 555,59	1 434,81	2 864,86	4 121,54	4 122,91
Part d'agriculture à bas niveaux d'intrants [%]	5	20	70	50	20	10
Part de systèmes en production intégrée [%]	2	10	30	50	50	20
Part de systèmes conventionnels raisonnées [%]	93	70	-	-	30	70
Haies [Milliers km]	500*	547	935	939	619	549
Surfaces en agroforesterie avec 75 arbres/ha [Milliers ha]	140	232	596	1 499	1 212	232
Couverts végétaux [Milliers ha]	1 092	2 163,61	16 549,47	17 538,22	11 234,04	4 918,46
Solde céréales (exclu bière) [Milliers tonnes]	23 513	17 064,17	15 460,21	15 403,22	16 651,36	25 140,59
Solde oléagineux [Milliers tonnes]	695	- 499,46	- 664,11	- 514,04	- 528,15	- 512,97
Irrigation [Mdm^3]	2,70	3,58	1,85	2,28	3,07	4,50
Taux de protéines végétales sur protéines totales [%]	1,70	39	63	53	47	38
Surfaces irriguées [Millions ha]	1,72	2,58	1,48	2	2,58	3,68

* Ordre de grandeur basé sur les estimations de Pointereau (2006). Les estimations du linéaires de haies à l'échelle nationale sont lacunaires et pourront être précisées *via* le dispositif national de suivi des bocages.
Référence : P. Pointereau, F. Coulon, *La Haie en France et en Europe : évolution ou régression*, 2006 (https://rmt-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/documents/rnhc-interv-pointereau.pdf).

2. Production forestière

1. La forêt rend de multiples services écosystémiques, dont un puits de carbone et une source de matières renouvelables
293

2 La forêt française progresse en surface mais le secteur forêt-bois est fragile
297

3. Description de la méthode et outils de quantification
302

4. Des scénarios contrastés mobilisant différents leviers
303

5. Les forêts et le bois, essentiels pour la politique climatique
310

6. Des limites dans les simulations qui appellent à continuer les recherches
312

7. Références bibliographiques
314

8. Annexe : évolution des principales variables du secteur
315

1. La forêt rend de multiples services écosystémiques, dont un puits de carbone et une source de matières renouvelables

Systèmes multifonctionnels, les forêts sont au cœur d'une bioéconomie contribuant au développement durable de nos territoires avec des enjeux riches et complexes, que ce soit au niveau mondial, européen ou national.

Quatrième plus grande forêt d'Europe, la forêt française rend de nombreux services essentiels à la société. Elle constitue un réservoir de biodiversité inestimable, contribue à la conservation des sols et de la qualité des eaux, au captage et au stockage du carbone, aux services socioculturels et fournit du bois pour les matériaux et l'énergie. Si les forêts sont identifiées comme des **sources majeures de solutions aux défis environnementaux**, elles sont également **soumises aux effets du changement climatique (sécheresses, incendies, maladies…) avec des incertitudes sur les évolutions attendues des écosystèmes.**

Au niveau européen, une nouvelle stratégie forestière a été approuvée en juillet 2021. Cette stratégie définit une vision et des mesures concrètes pour accroître le nombre et la qualité des forêts dans l'UE et renforcer leur protection, leur restauration et leur résilience pour faire en sorte qu'elles soient gérées durablement, de manière à préserver les services écosystémiques essentiels qu'elles fournissent et dont la société dépend. En France, les stratégies nationales bas carbone et pour la biodiversité, le Programme national de la forêt et du bois et la loi de transition énergétique pour la croissance verte structurent les objectifs de développement des usages du bois et les orientations du secteur forestier, essentiels à la transition écologique et à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.

1.1. Les forêts et les usages du bois constituent une clé de voûte du cycle du carbone

Les forêts subissent les effets du changement climatique et jouent un rôle majeur dans les stratégies d'atténuation. La forêt et les filières bois contribuent à l'atténuation climatique par trois leviers essentiels [1] :

1. un rôle de réservoir du fait du stockage du carbone dans la végétation (biomasse vivante et bois mort) et les sols (litière et carbone organique des sols) des forêts, ainsi que dans les produits bois ;

2. un rôle de puits si les stocks de carbone dans le réservoir forestier augmentent ; ce qui permet de retirer du CO_2 de l'atmosphère[1] ;

3. un rôle de réduction des émissions d'origine fossile grâce à l'utilisation du bois en substitution d'autres matériaux (acier, ciment, etc.) ou énergies (charbon, pétrole, gaz, etc.), davantage consommateurs ou émetteurs de carbone fossile.

Ces mécanismes doivent être évalués conjointement car ils sont interconnectés : une action de réduction des émissions d'origine fossile par substitution, ou destinée à favoriser le stockage dans les produits bois, peut avoir un effet sur la fonction de puits ou de réservoir de carbone des forêts.

Une approche globale allant des choix portant sur l'évolution de la surface forestière, le taux de prélèvements du bois, les modes de gestion sylvicole et l'utilisation du bois récolté (liés aux modes de consommation et choix politiques) est nécessaire pour la construction des scénarios prospectifs et pour trouver des équilibres entre les différents leviers. Par ailleurs, ces choix pourront avoir un impact sur le niveau d'importation de bois et donc sur les impacts de la gestion forestière hors de France.

1.2. Une forêt plus résiliente est essentielle dans la lutte contre le changement climatique

Les premiers effets du changement climatique sont observés depuis quelques années, avec l'augmentation des épisodes de sécheresse, des tempêtes et des crises sylvosanitaires (*i.e.* provoquées par des invasions biologiques). Ces crises, dont on attend une augmentation forte des occurrences dans les décennies à venir, impactent de façon importante les peuplements forestiers et inquiètent les acteurs de la filière. La séquestration de carbone et la production de bois font partie des services rendus par la forêt les plus touchés. Le puits de carbone que représentent les forêts actuellement en France pourrait se voir fortement diminué. La mise en place de stratégies d'adaptation permettant d'augmenter la résilience des écosystèmes dans un contexte incertain ainsi que la reconstitution des peuplements en crise sylvosanitaire deviennent indispensables. Les stratégies à adopter font l'objet de débats : favoriser la diversité (le maintien de la diversité génétique, des peuplements mixtes et des structures multistrates en évitant les coupes rases), le contrôle de la densité des peuplements, l'adaptation des essences aux conditions qui évoluent… Les actions favorisant la séquestration de carbone dans les écosystèmes ainsi que les actions de mobilisation de biomasse doivent impérativement s'articuler avec celles favorisant la résilience des peuplements face au changement climatique. À l'inverse, seul un changement climatique atténué permettra d'assurer la réussite des stratégies d'adaptation des forêts. Ainsi, les mesures d'adaptation présentant le meilleur bilan carbone en limitant l'impact sur le stockage de carbone à court terme et sur la biodiversité sont à favoriser.

1.3. Les prélèvements du bois doivent préserver les services environnementaux rendus par les forêts

La récolte de bois doit se faire dans le respect de la préservation des écosystèmes (biodiversité, sol, eau) et des différentes fonctions de la forêt. En effet, les risques de générer des impacts négatifs sur la biodiversité, la qualité des sols, les autres fonctions écologiques assurées par les forêts (régulation et qualité de l'eau…) pourraient augmenter. Les scénarios à plus fort niveau de prélèvements s'ajouteront à l'évolution des pratiques de ces dernières années, avec plus de mécanisation. Les engins forestiers employés pour réaliser les coupes et sortir le bois de la forêt peuvent avoir un impact sur les sols forestiers (tassement, exports de certaines parties de l'arbre riches en minéraux…) et donc à terme sur la bonne santé des éco-

1 Inversement une réduction des stocks génère des émissions de CO_2 : c'est une source de carbone.

systèmes forestiers si les pratiques ne sont pas encadrées. Des guides de bonnes pratiques de récolte permettant de limiter les risques sont disponibles [2]. Les choix des stratégies de gestion mises en œuvre doivent être adaptés aux différents contextes pédoclimatiques et sylvicoles.

1.4. Les usages du bois en substitution des ressources non renouvelables doivent être optimisés

Le bois est une ressource renouvelable qui peut être utilisée à la place d'autres matériaux ou énergies d'origine fossile. Pour garantir son caractère renouvelable, la récolte de bois doit s'inscrire dans un cadre de gestion durable des forêts assurant le renouvellement des peuplements et la préservation des services rendus par les forêts.

Les usages du bois doivent être optimisés pour conserver le plus longtemps possible le carbone stocké dans les produits et maximiser les effets de substitution aux énergies fossiles. La priorité doit aller aux usages de long terme, en particulier le bois d'œuvre, *i.e.* développer des usages matériaux, qui correspondent le plus souvent aux débouchés les plus rémunérateurs. L'utilisation en cascade du bois permet d'optimiser son usage. La nouvelle stratégie forestière européenne met en avant ce principe qui est défini de la façon suivante : « Selon le principe de cascade, le bois est utilisé dans l'ordre de priorité suivant : 1) produits à base de bois ; 2) prolongement de leur durée de vie ; 3) réutilisation ; 4) recyclage ; 5) bioénergie et 6) élimination. »

Le bois énergie n'est pas un moteur économique suffisant pour sortir la biomasse de la forêt. Il ne permet pas de rentabiliser à lui seul une coupe car son prix reste largement inférieur à celui du bois d'œuvre. Au-delà des aspects économiques, l'optimisation de l'usage du bois est une condition indispensable pour obtenir un bon bilan environnemental global de l'utilisation du bois.

L'orientation de la récolte vers des usages à longue durée de vie est un levier majeur.

Il faut veiller à ce que le développement des produits bois soit cohérent avec la disponibilité du bois dans les forêts françaises afin de limiter les importations. Aujourd'hui, une partie très importante du bois utilisé dans la construction est issue du bois résineux alors que la forêt française est composée d'essences feuillues pour les deux tiers. La filière exporte donc surtout du bois rond feuillu et importe du bois résineux. Promouvoir l'utilisation du bois dans la

construction sans veiller à la cohérence entre les ressources utilisées et celles disponibles sur le territoire national pourrait conduire à augmenter les importations du bois résineux ou, à terme, à transformer des forêts de feuillus en résineux en France avec des impacts environnementaux négatifs. En revanche, utiliser plus de feuillus et optimiser leur usage est possible, par exemple en utilisant du bois de qualité secondaire dans des matériaux à longue durée de vie plutôt qu'en chauffage, ce qui favoriserait le stockage de carbone sans augmenter les importations ou les impacts sur les forêts. Le développement du recyclage des produits bois en fin de vie, faible aujourd'hui, est également un levier important qui permettrait d'augmenter le temps de stockage du carbone dans les produits bois.

Le bois énergie fait partie des filières clés pour atteindre les objectifs de développement des énergies renouvelables inscrits dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LETCV), qui prévoit une augmentation de leur contribution de 16 % dans la consommation finale d'énergie en 2016 à 32 % en 2030. Dans un scénario où les objectifs biomasse énergie inscrits dans la Program-

mation pluriannuelle de l'énergie (PPE) sont atteints, le taux de récolte de bois en forêt devrait augmenter. Les autres gisements de ressources biomasse devront également être fortement mobilisés pour atteindre les objectifs (connexes des industries du bois, déchets bois, bois bocager, résidus agricoles, taillis courte ou très courte rotation [TCR ou TTCR] et nouvelles plantations sur des terres non forestières aujourd'hui).

Développer davantage les usages du bois pour l'énergie et les matériaux engendre une mobilisation accrue du bois en forêt. Cette mobilisation nécessitera une rupture forte dans la dynamique actuelle de gestion et de récolte de bois, qui implique de lever des freins socio-économiques importants chez les propriétaires forestiers privés et de tenir compte des autres usages économiques de la forêt (espace récréatif, chasse…). Il faut aussi penser à limiter les impacts que ces récoltes supplémentaires pourraient avoir sur les écosystèmes forestiers (biodiversité, sol, stockage de carbone…). Environ 80 % du potentiel de récolte supplémentaire concerne des essences feuillues et est concentré dans les propriétés privées, et plus particulièrement celles de faible superficie [3] [4]. Enfin la mobilisation du compartiment bois énergie est intimement liée à la mobilisation du bois d'œuvre.

1.5. Un fragile équilibre entre augmentation des récoltes et séquestration du carbone

L'objectif de neutralité carbone nécessite de favoriser les puits de carbone, or, les forêts sont aujourd'hui le puits de carbone le plus important en France. Différents projets de recherche [5] [6] et études [7] montrent qu'une intensification des prélèvements de bois nécessaire au développement accru de l'usage du bois aura un impact négatif sur la séquestration de carbone dans les forêts. Même si la forêt française peut rester un puits de carbone à l'horizon 2050 (production biologique nette supérieure aux prélèvements), l'intensité de la séquestration sera moindre. Le niveau de contraction du puits étant directement relié à l'intensité des prélèvements de bois en forêt, un équilibre devra être trouvé entre ces deux leviers.

1.6. L'augmentation de la surface forestière en France n'empêche pas des défrichements

La surface des forêts françaises augmente car les surfaces des boisements sont plus importantes que celles des défrichements[2]. Ces derniers représentent en France métropolitaine une émission de 7,6 $MtCO_2eq$/an en 2019 [8] [9].Réduire, voire stopper les défrichements, est donc un levier important pour limiter les émissions de GES.

Parallèlement, l'augmentation de la surface forestière doit se faire dans le respect d'autres usages légitimes de terres (production agricole alimentaire notamment) et permettre en particulier la restauration des terres dégradées. Par ailleurs, les choix de consommation et les orientations politiques peuvent avoir un impact sur les importations de bois, donc sur la gestion forestière hors de France, ce qui peut potentiellement avoir des conséquences sur le niveau de déforestation ou de dégradation des forêts hors de France, sachant que la déforestation contribue à 12 % des émissions mondiales.

2 Conversion d'une surface forestière pour une autre utilisation. Les défrichements sont encadrés par la législation et soumis à des mesures compensatoires.

2. La forêt française progresse en surface mais le secteur forêt-bois est fragile

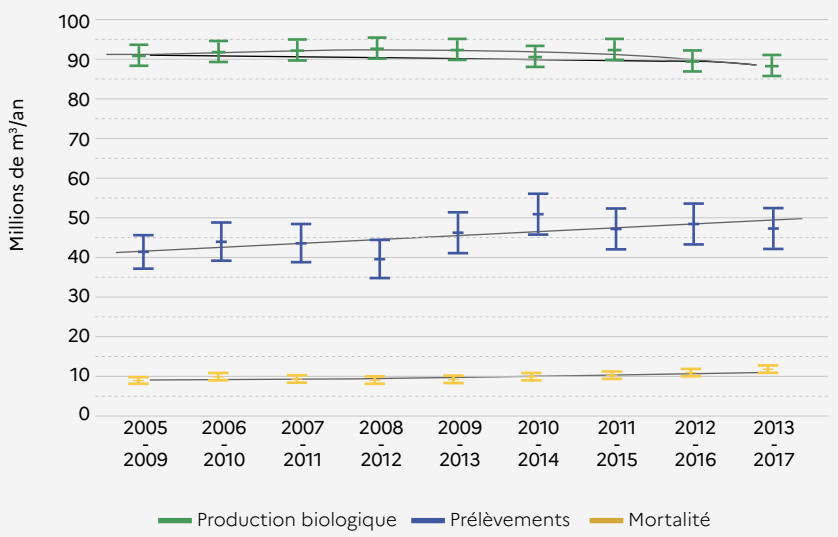
2.1. Une forêt en forte croissance ces dernières décennies

La forêt métropolitaine est en croissance, à la fois en superficie et en volume. Il s'agit d'une croissance en volume de presque 50 % durant les trois dernières décennies ce qui fait de la forêt française un puits de carbone important. Elle se caractérise par une très grande diversité en fonction de sa localisation géographique (essences, types de propriété, modes de gestion…). Ainsi, sa superficie augmente régulièrement en passant de 19 % du territoire métropolitain en 1908 à 31 % du territoire avec 16,9 Mha en 2018 (dont 16,18 Mha pour les forêts de production).

Le stock de bois en forêt augmente également régulièrement, avec une progression de 60 % ces quarante dernières années. En effet, la production biologique, globalement stable depuis dix ans (90 Mm³ bois fort tige)[3], est très supérieure aux prélèvements et à la mortalité. Cependant, ces deux paramètres affichant une légère augmentation ces dernières années, la dynamique d'augmentation de stock sur pied ralentit *(Graphique 1)*. Les dernières données de l'Inventaire Forestier National (IFN) [10] montrent même une stabilisation des stocks de bois sur pied en 2019. Cependant ces résultats sont à prendre avec précaution car ils intègrent une incertitude statistique importante. Compte tenu de cette incertitude, les résultats de la campagne 2020 viendront confirmer ou infirmer la tendance esquissée par les résultats 2019.

La forêt française métropolitaine appartient à des propriétaires privés (75 %) et publics (25 %, dont 9 % de forêts domaniales et 16 % d'autres forêts publiques, essentiellement communales). Elle est caractérisée par un morcellement important : 3,5 millions de propriétaires, dont 80 % ont une surface inférieure à 4 ha, seuil minimal souvent considéré pour permettre une gestion économiquement viable. Contrairement aux forêts du nord de l'Europe, la forêt française est essentiellement feuillue (70 % des surfaces).

Graphique 1 Évolution des flux (production biologique, prélèvements de bois et mortalité) en forêt métropolitaine



Source : IGN.

3 Le volume « bois fort tige » correspond au volume de la tige principale de l'arbre jusqu'au Ø 7 cm.

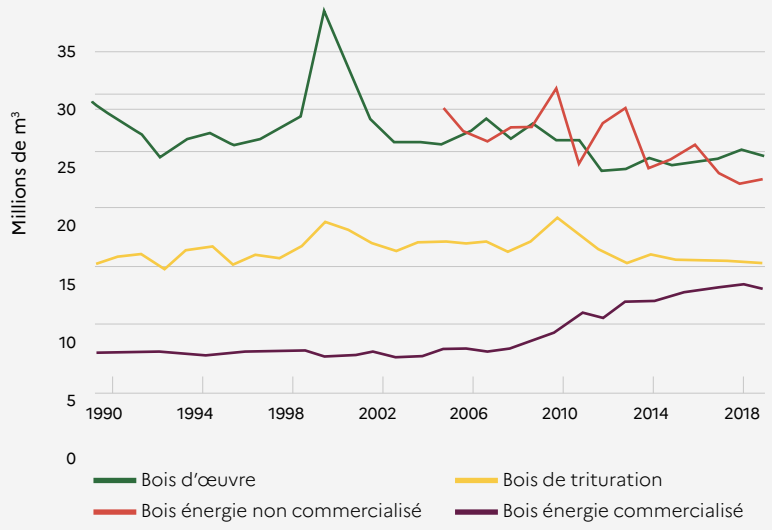
2.2. Des prélèvements de bois en augmentation

Selon les données de l'Institut Géographique National (IGN) [10] [11], le volume annuel des prélèvements[4] de bois en forêt a augmenté ces dernières années en France métropolitaine, passant de 40 Mm³ (bois fort tige) en moyenne sur la période 2005-2009 à 49 Mm³ (bois fort tige) sur la période 2010-2018 (IFN). La répartition est à peu près égale entre essences résineuses et feuillues (sachant que les essences de résineux n'occupent que 30 % de la surface, ces prélèvements par unité de surface sont donc beaucoup plus importants que pour les feuillus). Les données de récolte de bois d'Agreste[5] intégrant forêt et hors forêt[6] montrent en revanche une récolte totale globalement stable, avec des disparités selon les qualités de bois *(Graphique 2)*. Dans la récolte, on distingue la récolte non commercialisée qui représente 40 % du volume (autoconsommation de bois bûches par les particuliers principalement) de la récolte commercialisée. Concernant le bois énergie, on note une forte augmentation de la récolte commercialisée, principalement destinée à la production de plaquettes, à mettre en parallèle avec une forte diminution du bois de feu autoconsommé (bois bûches). Notons qu'en plus de la récolte directe de bois énergie, une partie importante des usages énergétiques provient des connexes des industries et de la valorisation des produits en fin de vie *(Figure 1)*.

En considérant que 75 % du bois non commercialisé proviendrait des forêts, la récolte de bois forestier en 2018 serait de 52 Mm³ [12].

Ces dix dernières années, les pratiques de récolte de bois ont évolué avec une forte progression de la mécanisation forestière, principalement pour la récolte de résineux (de l'ordre de 80 % en 2018) et plus faiblement pour les feuillus (10 % en 2013 à 15 % environ en 2018).

Graphique 2 Évolution de la récole de bois en France métropolitaine par destination



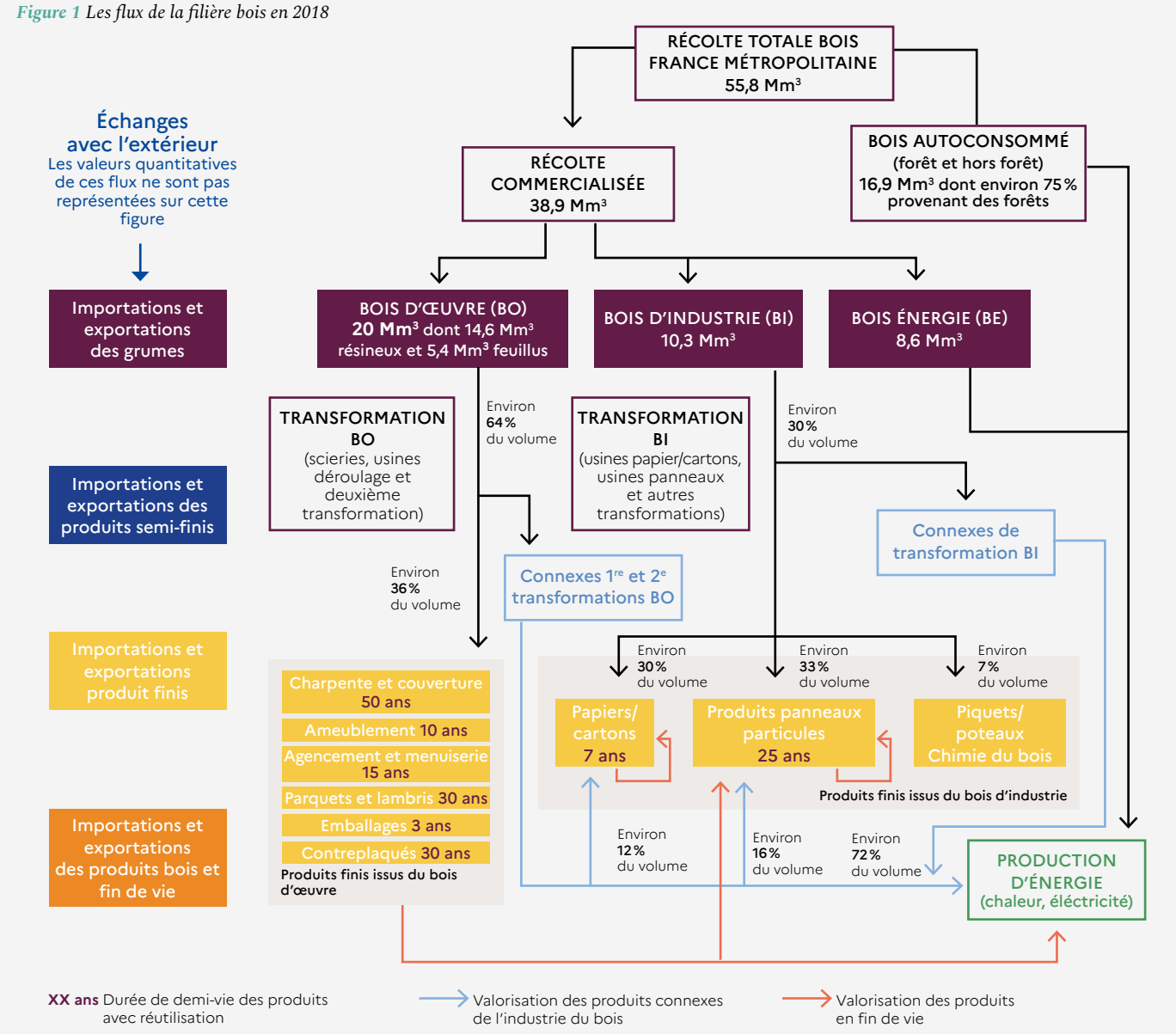
Source : Agreste.

4 Pour estimer la récolte du bois à partir des données de prélèvements exprimés en bois fort tige mesurés par l'IGN, il faut convertir en volume aérien total en utilisant des facteurs d'expansion des branches et estimer les pertes d'exploitation (partie de l'arbre coupé restant en forêt).

5 Agreste : service statistique du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt. Les données de récolte Agreste [12] intègrent directement la récolte commercialisée à laquelle s'ajoute d'autres indicateurs permettant d'estimer le bois énergie non commercialisé.

6 Environ 25 % de la récolte non commercialisée provient de bois hors forêt.

Figure 1 *Les flux de la filière bois en 2018*



Source : ADEME [1] sur la base de Agreste [12] et IGD 2020 [13].

2.3. Le puits forestier tend à se réduire ces dernières années

Deux types de flux GES sont liés à la forêt : les flux de GES biogéniques liés au stockage/déstockage de carbone dans la biomasse et les sols et les émissions fossiles liées à la consommation d'énergies fossiles dans la filière bois.

Dans l'inventaire national de GES, le stockage/déstockage de carbone dans la biomasse et les sols sont comptabilisés dans le secteur intitulé « Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) ». Il se fonde notamment sur les données de l'IGN, des services statistiques du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, du bilan de l'énergie (SDES) et des réseaux de suivi des sols.

En France, sur la période récente, les forêts présentent globalement un puits de carbone : les absorptions de CO_2 liées à la croissance de la biomasse sont supérieures aux émissions de CO_2 liées à la dégradation ou à la combustion du bois par mortalité naturelle et fin de vie des produits bois issus des prélèvements. Cependant, cela ne signifie pas que toutes les forêts soient systématiquement des puits de carbone, elles peuvent même constituer des sources supplémentaires de CO_2 pour l'atmosphère si les prélèvements forestiers dépassent l'accroissement nette de la mortalité.

En 2018, en France, le puit total est estimé à 50,4 $MtCO_2eq$[7] : 49,5 $MtCO_2eq$ pour les forêts (dont 49,4 $MtCO_2eq$ pour les forêts métropolitaines)[8] et 0,9 $MtCO_2eq$ pour les produits bois *(Graphique 3)*. Au total cela correspond à une séquestration d'environ 11 % des émissions de GES.

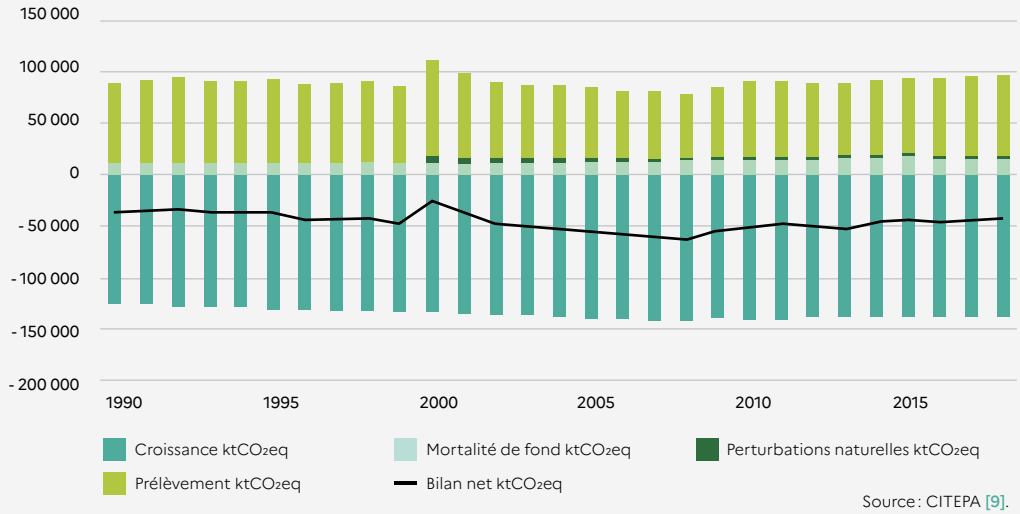
Il est à noter que les périodes récentes de sécheresses, de canicules et le développement de maladies ont des impacts sur l'état sanitaire des écosystèmes forestiers. Cette situation inédite génère des incertitudes quant à l'évolution de la forêt, notamment sa croissance et sa capacité en tant que puits de carbone.

Les émissions de CO_2 liées à la dégradation ou à la combustion des produits bois en fin de vie et du bois énergie sont comptabilisées dans le calcul du puits forestier, au sein du secteur UTCATF, en tant que pertes de stocks de carbone. Ces pertes sont comptabilisées comme émissions au moment des prélèvements du bois sur la ressource ou bien en fin de vie pour les produits bois à longue durée de vie. Afin d'éviter un double comptage, ces émissions de CO_2 ne sont pas comptabilisées dans les secteurs consommateurs de bois[9]. Le Règlement (UE) n° 2018/841 relatif au secteur UTCATF marque l'obligation de comptabilisation du puits forestier par rapport à un niveau de référence projeté[10], établi sur la base des pratiques historiques, afin de prendre en compte les éventuels impacts liés aux modifications des pratiques sylvicoles ou du taux de prélèvement du bois dans les forêts restant forêts [14].

On notera que les émissions liées aux défrichements[11] en lien avec l'urbanisation, ou encore l'extension des terres agricoles, ne sont pas associées à la catégorie « Forêt » dans les inventaires. Les changements d'utilisation des terres sont rapportés selon l'usage final (par exemple, les « forêts converties en terres cultivées » sont incluses dans la catégorie « Terres cultivées »). Les défrichements représentent, en 2019, une émission de 7,6 $MtCO_2eq$/an en France métropolitaine et de 3,7 $MtCO_2eq$/an en Outre-mer [8].

Dans l'inventaire national de GES [8], les émissions de gaz à effet de serre d'origine fossile de la filière bois sont comptabilisées de façon segmentée dans différents secteurs. En 2018, elles correspondent à 0,56 $MtCO_2eq$ liées à la consommation d'énergies fossiles en sylviculture, 0,55 $MtCO_2eq$ liées aux scieries et 2,4 $MtCO_2eq$ à l'industrie papier-carton, auxquelles s'ajoutent les émissions d'utilisation du bois dans la construction et la fabrication de meubles. Cependant, pour ce dernier secteur, la comptabilisation dans l'inventaire national ne permet pas de différencier le bois des autres matériaux.

Graphique 3 Évolution du puits forestier en France métropolitaine (ligne noire correspondant au bilan entre production biologique brute [croissance] et mortalité + prélèvements)



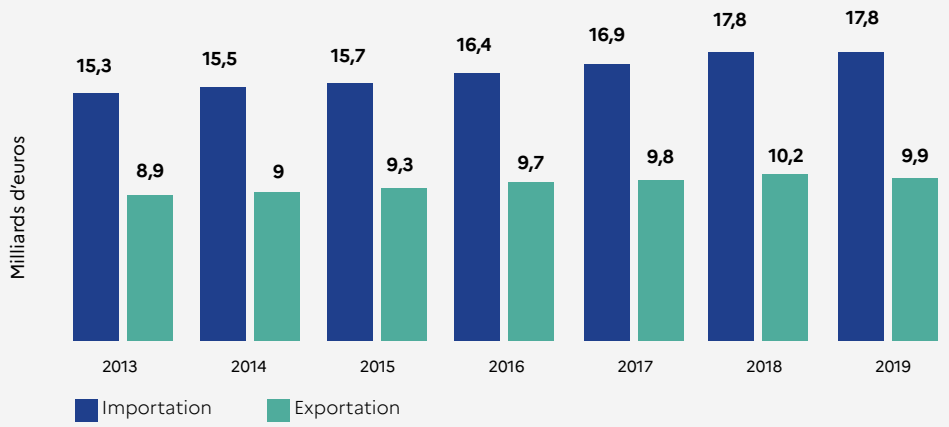
Source : CITEPA [9].

7 Intégrant les émissions de CH_4 et N_2O liées notamment à la combustion de la biomasse lors du brûlage en forêt des résidus de coupes et des feux de forêts. Le puits de CO_2 est estimé à 52,86 $MtCO_2eq$.
8 Notons que l'inventaire national de GES ne comptabilise pas les variations de stocks de carbone dans les sols forestiers et le bois mort dans les forêts gérées, en considérant ces compartiments du réservoir forestier à l'équilibre.
9 Les émissions de CH_4 et N_2O liées à la combustion de la biomasse pour la production d'énergie sont en revanche comptabilisées dans les secteurs consommateurs de bois, estimés en 2019 à 1,29 $MtCO_2eq$ principalement dans le secteur résidentiel.
10 FRL pour *Forestry Reference Level* en anglais. La comparaison entre le puits forestier estimé dans l'inventaire national et le FRL permettra de comptabiliser un débit ou un crédit comptable, calculé sur chaque période d'engagement.
11 Conversion d'une surface forestière à une autre utilisation. Aujourd'hui, malgré un bilan net positif en termes d'augmentation de la surface forestière en France, des défrichements existent mais sont encadrés par la législation et soumis à des mesures compensatoires.

2.4. La filière bois présente un fort déficit commercial

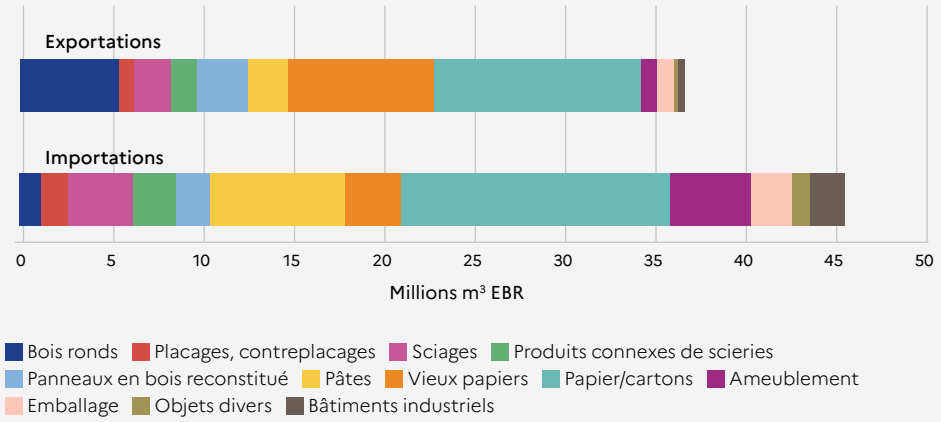
Les filières bois représentent plus de 440 000 emplois et cumulent 60 MdEUR de chiffre d'affaires. Cependant, l'activité économique de la filière forêt/bois française est confrontée à de nombreuses difficultés. Alors que la France dispose de ressources forestières abondantes, les filières bois représentent le deuxième poste de déficit de la balance commerciale, déficit qui s'est accru ces dernières années (6,4 MdEUR en 2013, 7,9 Mds en 2019) [15] *(Graphique 4)*. La France exporte des produits peu transformés (bois ronds feuillus principalement) et importe massivement des produits transformés à plus haute valeur ajoutée (principalement sciages résineux, meubles, pâtes à papier, papiers/cartons, panneaux, menuiseries…) *(Graphique 5)*.

Graphique 4 Évolution du commerce extérieur de la filière bois



Source : Veille Économique Mutualisée de la filière forêt-bois [15].

Graphique 5 Structure en volume des échanges du secteur forêt bois papier ameublement en 2018



Source : IGD 2020 [13].

3. Description de la méthode et outils de quantification

Les scénarios de gestion forestière utilisés dans cet exercice prospectif s'appuient sur les scénarios étudiés dans l'étude INRAE/IGN 2020 [5]. Dans ce cadre, différents modèles ont permis de simuler les niveaux de prélèvement de bois par catégorie d'usage et l'évolution du puits forestier : le modèle de ressources forestières Margot de l'IGN, le modèle biophysique GO+ pour intégrer les effets climatiques sur les dynamiques forestières et le modèle FFSM de modélisation économique de la filière bois. Pour plus d'information sur les modèles [5].

Le point de départ de l'étude INRAE/IGN 2020 étant l'année 2013 (période 2011-2015), certains ajustements ont été réalisés pour établir le point de départ à l'année 2018, en utilisant les données réellement observées issues des statistiques Agreste pour la récolte de bois et des données de l'inventaire national de GES pour le puits forestier. Voici le détail des ajustements réalisés :

- **récolte de bois** : les valeurs de départ de l'année 2018 correspondent aux données de récolte Agreste en considérant que pour le bois non commercialisé 75 % proviendrait des forêts. La récolte totale en forêt en 2018 est de 52 Mm^3. Pour les années suivantes (2023, 2028…), nous avons appliqué l'évolution observée entre les données issues des simulations de l'étude INRAE/IGN et les données de départ Agreste[12] ;

- **puits forestier *in situ*** : la valeur de départ de l'année 2018 pour la biomasse vivante correspond à la donnée de l'inventaire national de GES en 2018 soit 49,40 $MtCO_2$. Pour les années suivantes (2023, 2028…), nous avons appliqué l'évolution observée entre les données issues des simulations de l'étude INRAE/IGN et les données de départ de l'inventaire national de GES. Pour les données concernant les variations de stock de carbone dans le bois mort, les simulations de l'étude INRAE/IGN ont été directement utilisées. Les estimations sur la séquestration de carbone dans les sols forestiers s'appuient sur la valeur basse des références proposées par [16] (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*) ;

- **surface des forêts de production** : la valeur de départ de l'année 2018 correspond à 16,18 Mha selon les données de l'IGN. L'ensemble des scénarios analysés dans l'étude INRAE/IGN intègre une augmentation de la surface forestière de 40 000 ha/an. Les résultats présentés dans ce chapitre concernant l'évolution du puits forestier et les disponibilités en bois intègrent donc cette évolution de la surface forestière. Cependant, dans le présent exercice prospectif, l'évolution de la surface des forêts change selon les scénarios du secteur agricole (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*). Des ajustements ont donc été réalisés par la suite dans le chapitre puits de carbone pour analyser l'évolution du puits en différenciant les surfaces actuelles des nouvelles surfaces (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*). Des disponibilités en bois sur les nouvelles surfaces allant au-delà de 40 000 ha/an (notamment issues des cultures lignocellulosiques) ont été calculées et intégrées dans le chapitre sur les ressources en biomasse (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*).

La récolte de bois BIBE (bois industrie et bois énergie) est présentée de façon agrégée car les ressources BI et BE sont substituables et peuvent servir aux deux usages. Seuls les Menus Bois (MB *i.e.* les petites branches de diamètre inférieur à 7 cm) sont uniquement destinés à l'énergie, mais ce gisement est faible comparativement au gisement BIBE et les usages industrie ne dépasseront pas le gisement BIBE disponible, quel que soit le scénario.

Quelques remarques sur les hypothèses retenues :

- l'étude INRAE/IGN présente des résultats concernant le puits forestier et la disponibilité en bois « en climat actuel » et en « climat aggravé » (RCP 8.5) à l'horizon 2050. Faute des données pour un scénario climatique RCP 4.5, il a été décidé d'utiliser les résultats RCP 8.5 (trajectoire correspondant à un réchauffement compris entre 2,6 et 4,8 °C en 2050) ;

- pour pallier l'absence de données sur le scénario intensif sans plan de reboisement en climat aggravé, nous avons appliqué l'écart observé entre les jeux de données des scénarios intensifs avec et sans plan de reboisement en climat actuel ;

- nous avons fait une régression linéaire simple pour extrapoler les données des résultats de cette étude aux pas de temps de la prospective ADEME.

12 Par exemple pour l'année 2023, nous avons appliqué l'écart entre les données des simulations INRAE/IGN entre 2018 et 2023 à la donnée Agreste 2018.

4. Des scénarios contrastés mobilisant différents leviers

De façon générale, dans la construction des scénarios forêts de cet exercice prospectif, nous avons souhaité montrer différentes stratégies de gestion forestière durables mais contrastées, en changeant notamment le taux de prélèvements de bois, tout en restant toujours en deçà de l'accroissement biologique des forêts. Les scénarios conduisent donc à une disponibilité variable en bois pour la filière bois matériaux et énergie, mais aussi à une forte variabilité du puits forestier. Pour cela, nous nous sommes basés notamment sur les résultats de l'étude INRAE/IGN [5] qui modélise trois scénarios de gestion qui nous ont servi de base pour la construction des quatre scénarios du présent exercice. Le scénario « intensification » de l'étude INRAE/IGN a été séparé en deux en utilisant les résultats avec et sans plan de transformation des peuplements en plantations productives.

4.1. Scénario tendanciel

Nous avons considéré que le scénario tendanciel correspond au scénario « dynamiques territoriales » de l'étude INRAE/IGN (utilisé également pour le scénario 2 de cette prospective). Le niveau de prélèvements de bois de ce scénario est proche du scénario SNBC-AME (avec mesures existantes).

Tableau 1 Principaux facteurs différenciant les scénarios

S1	S2	S3	S4
Scénario extensification de l'étude INRAE/IGN 2020	**Scénario « dynamiques territoriales » de l'étude INRAE/IGN 2020**	**Scénario intensification *sans* plan de reboisement de l'étude INRAE/IGN 2020**	**Scénario intensification *avec* plan de reboisement de l'étude INRAE/IGN 2020**
= volume récolté constant	↗ Taux de prélèvement	↗ ↗ Taux de prélèvement Dynamisation de la sylviculture	↗ ↗ Taux de prélèvement Dynamisation de la sylviculture Plantations résineuses

4.2. Scénario 1 : augmentation du puits de carbone forestier en maintenant la récolte de bois

Le scénario 1 s'appuie sur le scénario « extensif » de l'étude INRAE/IGN 2020. Il vise à maintenir le volume global de récolte de bois constant en valeur absolue autour de 52 Mm^3/an sur toute la période. Le taux de prélèvements sur l'accroissement est d'environ 55 % en 2050.

Ce scénario est caractérisé par une plus forte naturalité des forêts avec de vastes espaces en libre évolution et une sylviculture « proche de la nature » avec un pilotage important par les dynamiques naturelles. Les prélèvements de bois en haute montagne et en zone méditerranéenne sont peu sollicités, ces secteurs restant en sylvicultures extensives.

Les résultats concernant l'évolution du puits forestier *in situ* et les récoltes de bois par catégorie dans S1 sont présentés dans le *Tableau 2* en considérant une progression de la surface forestière de 40 000 ha/an.

Tableau 2 Évolution du puits forestier et de la récolte de bois dans S1

Sous-catégories		2018	2030	2050
Puits de carbone forestier [$MtCO_2$/an]	*In situ* – biomasse vivante	49	57	67
	In situ – sols	7	7	6
	In situ – bois mort	5	5	5
	***In situ* total**	**61**	**69**	**78**
Récolte de bois [Mm^3/an]	Bois d'œuvre feuillus	5	5	5
	Bois d'œuvre résineux	15	14	15
	Bois d'œuvre total	**20**	**19**	**20**
	Bois industrie – bois énergie et menus bois total	32	31	32
	RÉCOLTE TOTALE	**52**	**50**	**52**
Surface forestière [Mha]	Surface forestière prise en compte	16,18	16,66	17,46

4.3. Scénario 2 : un puits de carbone forestier maintenu avec une continuité des pratiques sylvicoles

Le scénario 2 est basé sur le scénario « Dynamiques Territoriales » de l'étude INRAE/IGN 2020.

Globalement, ce scénario vise un maintien des taux de coupe relevés par l'Inventaire forestier national pendant la période d'observation 2005-2013 et qui sont le reflet des pratiques réelles de terrain. Cette approche a déjà été utilisée dans de précédentes études de disponibilité en bois [3] [4]. En pratique, en utilisant les résultats à climat aggravé et avec les ajustements réalisés, le taux de prélèvement passe de 59 % en 2018 à 64 % en 2050 avec un volume de récolte de bois 60 Mm³/an en 2050.

Ce scénario est caractérisé par le maintien d'une forte hétérogénéité des modes de gestion selon les régions. Ainsi la valorisation peut être très forte dans le massif landais et réduite dans les zones de montagne et en zone méditerranéenne.

Les résultats concernant l'évolution du puits forestier *in situ* et les récoltes de bois par catégorie dans S2 sont présentés dans le *Tableau 3* en considérant une évolution de la surface forestière de 40 000 ha/an.

Tableau 3 Évolution du puits forestier et de la récolte de bois dans S2

Sous-catégories		2018	2030	2050
Puits de carbone forestier [$MtCO_2$/an]	*In situ* – biomasse vivante	49	48	46
	In situ – sols	7	7	6
	In situ – bois mort	5	5	5
	***In situ* total**	**61**	**60**	**57**
Récolte de bois [Mm³/an]	Bois d'œuvre feuillus	5	6	6
	Bois d'œuvre résineux	15	15	17
	Bois d'œuvre total	**20**	**21**	**23**
	Bois industrie – bois énergie et menus bois total	32	34	38
	RÉCOLTE TOTALE	**52**	**55**	**61**
Surface forestière [Mha]	Surface forestière prise en compte	16,18	16,66	17,46

4.4. Scénario 3 : l'augmentation des prélèvements réduit le puits de carbone forestier

Le scénario 3 est basé sur le scénario « Intensification » sans plan de reboisement de l'étude INRAE/IGN qui, avec climat aggravé, passe d'un taux de prélèvement de 59 % aujourd'hui à environ 80 % en 2050 avec un volume de récolte de bois de 70 Mm^3/an.

Le scénario de gestion « Intensification » vise une augmentation de la récolte en faisant l'hypothèse d'une levée d'un certain nombre de blocages actuels : développement de l'exploitation et de la valorisation des feuillus, accroissement de la récolte des gros bois résineux, hausse des prélèvements dans les régions méditerranéennes et montagnardes, etc. L'objectif est une augmentation progressive du niveau de prélèvement visant essentiellement une augmentation des prélèvements dans les forêts privées et communales, sur les feuillus et sur les gros bois de résineux. Cette approche a déjà été utilisée sous la formule de « sylviculture dynamique ».

Vu l'absence de résultats dans l'étude INRAE/IGN pour le scénario intensif sans plan de reboisement en climat aggravé, nous avons appliqué l'écart observé entre les données avec et sans plan de reboisement en climat actuel (*cf.* *section 3* pour plus de détails).

Les résultats concernant l'évolution du puits forestier *in situ* et les récoltes de bois par catégorie dans S3 sont présentés dans le *Tableau 4* en considérant une progression de la surface forestière de 40 000 ha/an.

Tableau 4 *Évolution du puits forestier et de la récolte de bois dans S3*

Sous-catégories		2018	2030	2050
Puits de carbone forestier [$MtCO_2$/an]	*In situ* – biomasse vivante	49	34	26
	In situ – sols	7	7	6
	In situ – bois mort	5	6	4
	***In situ* total**	**61**	**47**	**36**
Récolte de bois [Mm^3/an]	Bois d'œuvre feuillus	5	7	7
	Bois d'œuvre résineux	15	17	19
	Bois d'œuvre total	**20**	**24**	**26**
	Bois industrie – bois énergie et menus bois total	32	41	45
	RÉCOLTE TOTALE	**52**	**65**	**71**
Surface forestière [Mha]	Surface forestière prise en compte	16,18	16,66	17,46

4.5. Scénario 4 : un plan de transformation pour une forêt plus productive réduit fortement le puits de carbone forestier à court terme

Le scénario 4 est basé sur le scénario « Intensification » de l'étude INRAE/IGN, intégrant en plus de la dynamisation de la sylviculture un plan de reboisement avec des essences productives en remplacement des forêts existantes moins productives (+ 500 000 ha répartis sur les dix premières années) avec climat aggravé. Le taux de prélèvement atteint environ 82 % en 2050 en passant par un maximum de 95 % en 2030 (lié aux coupes des peuplements en place pour le reboisement). Le volume de récolte de bois serait de 71 Mm^3 en 2050 avec un pic à 75 Mm^3/an en 2028[13].

Les résultats concernant l'évolution du puits forestier *in situ* et les récoltes de bois par catégorie dans S4 sont présentés dans le *Tableau 5* en considérant une progression de la surface forestière de 40 000 ha/an.

Tableau 5 Évolution du puits forestier et de la récolte de bois dans S4

Sous-catégories		2018	2030	2050
Puits de carbone forestier [$MtCO_2$/an]	*In situ* – biomasse vivante	49	16	25
	In situ – sols	7	7	6
	In situ – bois mort	5	6	5
	***In situ* total**	**61**	**29**	**36**
Récolte de bois [Mm^3/an]	Bois d'œuvre feuillus	5	8	8
	Bois d'œuvre résineux	15	18	21
	Bois d'œuvre total	**20**	**26**	**29**
	Bois industrie – bois énergie et menus bois total	32	43	42
	RÉCOLTE TOTALE	**52**	**69**	**71**
Surface forestière [Mha]	Surface forestière prise en compte	16,18	16,66	17,46

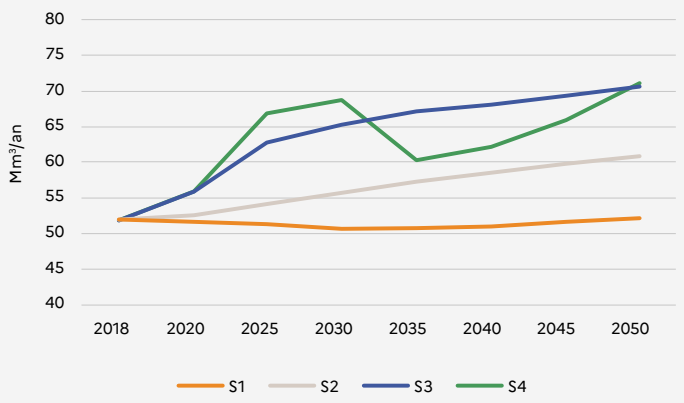
13 Pour plus de détails sur le plan de plantations forestières à haute productivité, voir l'ouvrage de l'étude INRAE/IGN 2020 [5].

4.6. Comparaison des principales quantifications des scénarios

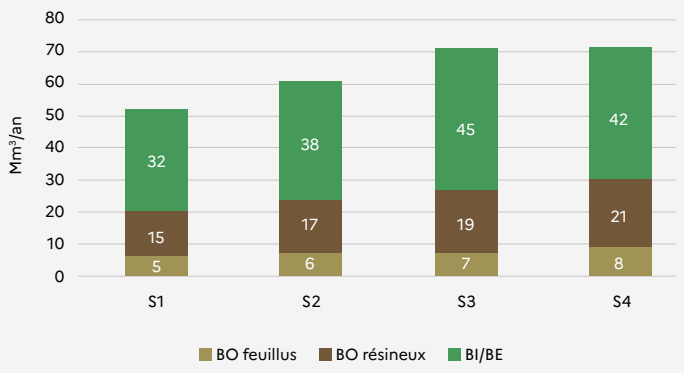
Les scénarios conduisent à différents niveaux de disponibilité en bois pour le développement de la filière bois matériaux et énergie : + 20 Mm³/an dans S4 par rapport à S1 à l'horizon 2050 *(Graphique 6)*. Le plan de reboisement intégré dans S4 avec des essences productives en remplacement des forêts existantes explique la forme de la courbe S4 : augmentation rapide de la récolte en début de période liée aux coupes de transformation des forêts existantes et réduction du rythme de récolte après 2030 liée au fait que les nouvelles plantations ne sont pas encore arrivées à maturité.

Le *Graphique 7* présente la récolte annuelle de bois dans les différents scénarios en 2050 par catégorie (bois d'œuvre feuillus, bois d'œuvre résineux et BIBE). La récolte additionnelle de bois en 2050 des scénarios 2, 3 et 4 par rapport à celle de S1 concerne en grande partie la catégorie BIBE liée à la qualité sylvicole des peuplements existants. En effet, les peuplements les plus faiblement exploités aujourd'hui, donc avec un potentiel de récolte supplémentaire plus important, sont constitués en grande partie par des essences de feuillus divers (ex. : châtaignier, charme, chêne pubescent, chêne vert, merisier, bouleau, érable, tilleul, frêne, noyer…), fréquemment des taillis anciens ou des plus jeunes accrus naturels. La proportion de bois d'œuvre dans cette typologie des peuplements reste faible. Cela est en partie dû à la définition de bois d'œuvre qui est basée sur les marchés de bois actuels (*cf.* chapitre *3.2. Enseignements, interprétations, limites et perspectives*). Le plan de reboisement de S4 intégrant la transformation des peuplements feuillus peu productifs en plantations de résineux conduit à une augmentation de la récolte de bois d'œuvre résineux.

Graphique 6 Récolte de bois en forêt dans les différents scénarios



Graphique 7 Récolte de bois en 2050 par catégorie dans les différents scénarios



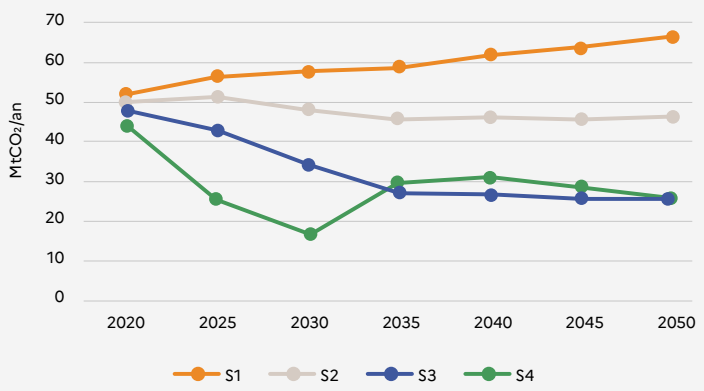
Les scénarios conduisent également à différents niveaux du puits forestier : + 42 $MtCO_2$/an dans S1 par rapport à S4 en 2050 *(Graphique 8)*. L'évolution du puits forestier *in situ* (c'est-à-dire les stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers) dépend donc du taux de prélèvement de bois, le puits *in situ* étant plus faible dans les scénarios augmentant les récoltes de bois. Les variations du puits *in situ* entre les différents scénarios sont liées notamment aux variations de stockage de carbone dans la biomasse vivante. L'évolution du puits dans S3 s'explique par le rythme d'augmentation de la récolte (plus important entre 2020 et 2030). Celle du puits dans S4 s'explique jusqu'en 2030 par les coupes pour reboisement avec des peuplements plus productifs puis jusqu'en 2050 par la croissance de ces nouvelles plantations.

Les dynamiques d'augmentation des stocks de carbone dans les sols sont les mêmes dans l'ensemble des scénarios du fait que les projections n'intègrent pas les effets des évolutions des pratiques sylvicoles.

Notons que l'évolution du puits forestier dépend également des effets du climat sur les forêts. Lorsqu'on compare les résultats de l'étude INRAE/IGN sous maintien du climat actuel (données non présentées dans ce rapport) et en climat aggravé, les modèles simulent un puits forestier plus faible en cas d'aggravation des effets du changement climatique, quand bien même le stockage annuel dans l'écosystème resterait positif. Dans ce cas, le puits étant plus fortement ralenti dans le scénario « Extensification », les différences entre les scénarios de gestion s'atténuent légèrement. Cependant, la dynamique de réduction du puits liée à l'augmentation des prélèvements reste plus importante. Donc le puits est plus faible dans les scénarios augmentant les récoltes de bois. Il faut cependant noter que les modèles intègrent les effets directs du changement climatique (modification des précipitations et températures) mais pas les effets indirects induits (incendies, tempêtes, crises sanitaires) (*cf.* chapitre *3.2. Enseignements, interprétations, limites et perspectives*).

Notons que l'effet plus ou moins important de la hausse des récoltes sur le puits de carbone dépendra des pratiques sylvicoles mises en œuvre, ainsi que de la manière dont ces pratiques peuvent améliorer ou détériorer la résilience des forêts face au changement climatique et aux diverses crises qu'elles pourraient être amenées à subir (tempêtes, incendies, sécheresses, invasions biologiques, etc.).

Graphique 8 Évolution du puits biomasse vivante dans les forêts dans les différents scénarios



5. Les forêts et le bois, essentiels pour la politique climatique

Les travaux actuels confirment le rôle crucial des forêts dans l'atteinte des objectifs de neutralité carbone de la France. Mais les leviers concernant la protection et le développement de puits de carbone ainsi que les leviers d'utilisation accrue du bois en substitution des matériaux et énergies d'origine non renouvelables sont interconnectés. Reste à trouver un équilibre optimal entre le développement de ces divers usages.

L'impact d'une augmentation de la récolte sur le puits de carbone forestier doit être pris en compte dans l'évaluation du bilan carbone des stratégies de développement des usages du bois. Cet impact conduit ainsi à une révision du principe de « neutralité carbone des émissions de CO_2 de combustion du bois », utilisé historiquement dans les analyses de cycles de vie de la filière bois énergie. Ce principe méthodologique n'est pas suffisant pour évaluer l'impact climatique du développement d'une filière nécessitant un nouvel approvisionnement en bois. Malgré un fort niveau d'incertitude, tant sur les mécanismes de séquestration de carbone (notamment liés aux effets du changement climatique) que sur l'économie des émissions d'origine fossile (notamment liée aux mécanismes du marché et aux évolutions des filières concurrentes), ces travaux permettent d'apporter quelques enseignements pour travailler la complémentarité entre les mécanismes d'atténuation du changement climatique. Notons également que l'analyse doit être multicritères et tenir compte de l'ensemble des aspects environnementaux comme la protection de la biodiversité et des sols, mais aussi économiques et sociaux.

Au niveau de la forêt, la gestion doit être durable pour préserver l'ensemble des services écosystémiques qu'elle rend et favoriser sa résilience face au changement climatique. Ci-dessous quelques leviers sur cet aspect :

- **préserver les surfaces forestières**, notamment en luttant contre l'artificialisation des terres ou l'expansion des terres cultivées sur des forêts et en luttant contre la déforestation importée ;

- **restaurer les peuplements dégradés** en respectant les bonnes pratiques et en favorisant, lorsque c'est possible, les dynamiques naturelles. C'est le cas en particulier pour les peuplements sinistrés par les invasions biologiques, les sécheresses, les tempêtes, les incendies, etc., ou par de mauvaises pratiques de gestion ;

- **favoriser les boisements sur des friches ou zones de déprise agricole** tout en respectant les bonnes pratiques : protection des sols et de la biodiversité, des cycles de l'eau, des paysages, diversification des essences et adaptation au relief et au climat d'aujourd'hui et de demain. Des points de vigilance s'imposent également afin d'éviter la concurrence entre usages des sols, en particulier avec l'alimentation ;

- **renforcer de manière conjointe la résilience des forêts face au changement climatique, leur biodiversité et leur stock et puits de carbone**. Pour définir des stratégies d'adaptation des forêts au changement climatique spécifiques aux différentes situations, les diagnostics de vulnérabilité et de biodiversité à l'échelle des peuplements sont des outils à encourager. De façon générale, la diversité constitue un élément central pour renforcer la résilience des peuplements. Il faut favoriser le maintien de la diversité génétique, la diversité des essences à l'échelle des peuplements et à l'échelle des paysages ou encore les structures irrégulières (diversité des âges et des tailles sur la parcelle) car ces structures sont plus résilientes aux perturbations et produisent des écosystèmes plus stables. La préservation de la qualité des sols et de la biodiversité favorisent également le bon fonctionnement des écosystèmes et donc leur résilience et repose sur plusieurs points de vigilance : éviter le labour en plein, prendre des mesures contre le tassement des sols, préserver les zones humides, conserver une part de gros et petits bois morts par terre et debout ainsi que des arbres creux, limiter la récolte des rémanents des coupes (menus bois et souches), créer des trames de vieux bois ou îlots de vieillissement, privilégier la production de bois d'œuvre et limiter le développement des systèmes d'exploitation dédiés uniquement à la production d'énergie (taillis). Ces pratiques favorisent la biodiversité ainsi que le stockage de carbone dans les écosystèmes. La gestion forestière représente une des solutions pour maîtriser une partie des risques, grâce au

> La préservation de la qualité des sols et de la biodiversité favorisent également le bon fonctionnement des écosystèmes et donc leur résilience.

contrôle de la densité et de l'âge des peuplements, à l'adaptation des essences aux conditions de stations qui évoluent et au suivi de l'état sanitaire. Cependant, laisser certaines surfaces en libre évolution (sans intervention) contribue aussi à diversifier les modes de gestion et à favoriser les mécanismes naturels d'adaptation des forêts. Toutefois, selon les territoires, l'adaptation active pourra être nécessaire, du fait d'un dépérissement et d'une mortalité importante ou de l'absence de régénération naturelle ;

- **améliorer les outils de suivi d'état sanitaire et de la durabilité des pratiques de gestion des forêts** à l'échelle territoriale comme par exemple le monitoring du renouvellement après coupes de bois, les impacts de l'exploitation sur la biodiversité ou les sols… ;

- **engager des démarches participatives pour établir des stratégies concertées de gestion des forêts à l'échelle des territoires** ;

- **renforcer les critères de durabilité des approvisionnements des installations bois énergie** en améliorant les systèmes de traçabilité et de vérification de la gestion durable des forêts ainsi que les méthodes de comptabilisation des émissions de GES biogéniques (*cf.* chapitre *3.2. Enseignements, interprétations, limites et perspectives*) ;

- **renforcer l'accompagnement financier (aides publiques et nouvelles sources de financement privées) des bonnes pratiques de gestion forestière** tout en renforçant l'écoconditionnalité des aides en s'aidant, par exemple, de la taxonomie de l'UE[14] qui permet de déterminer les conditions dans lesquelles les actions sylvicoles contribuent à l'atténuation du changement climatique.

Au niveau des usages du bois, ils seront d'autant plus bénéfiques pour le climat que l'usage est optimisé.

Ci-dessous quelques leviers sur cet aspect :

- **optimiser l'utilisation de biomasse en priorisant les usages à longue durée de vie**. Pour les favoriser, les leviers se situent tout au long de la filière : sylviculture orientée vers la production de bois de qualité, tri des grumes selon leurs caractéristiques, élargissement des gammes de dimension ou de qualité admissibles en scieries, amélioration des rendements matière, valorisation matière des produits connexes des industries, innovation technologique notamment dans les usages du bois feuillus pour une meilleure valorisation matière, écoconception des produits, réemploi et recyclage ;

- **continuer l'amélioration** de la performance environnementale des industries de transformation du bois (ex. : consommations énergétiques, gestion des résidus…) et du bois énergie (ex. : qualité de l'air, gestion des cendres) sur les appareils individuels et les installations collectives/industrielles ;

- **renforcer le tissu industriel national de transformation du bois matériau** nécessaire pour rééquilibrer la balance commerciale en améliorant les usages du bois domestique, favoriser la production des produits à longue durée de vie, limiter les distances de transport et les éventuels impacts sur les forêts à l'échelle mondiale ;

- **le bois énergie doit se développer sur la base de la complémentarité avec les usages matériaux**, en favorisant l'utilisation du bois en cascade. Il s'agit de brûler en priorité le bois ne trouvant pas de débouché matériau et issu de la valorisation des produits en fin de vie, les produits connexes des industries du bois ainsi que le bois des actions sylvicoles nécessaires à la récolte du bois d'œuvre ne trouvant pas de débouché matériau comme les coupes de cloisonnement, les coupes sanitaires, la récolte du houppier tout en laissant des menus bois au sol ou encore les coupes sélectives des arbres de faible diamètre.

14 Le règlement (UE) 2020/852 sur l'établissement d'un cadre visant à favoriser les investissements durables.

6. Des limites dans les simulations qui appellent à continuer les recherches

D'importants efforts de recherche ont permis d'améliorer les connaissances scientifiques concernant la quantification et l'identification des stratégies forestières d'atténuation du changement climatique. Mais des incertitudes restent encore à lever. Les simulations utilisées comportent des limites tant sur la comptabilisation des effets climatiques que sur la nécessité d'une meilleure prise en compte de l'ensemble des enjeux environnementaux, économiques et sociaux. Ci-dessous des limites et des pistes possibles pour des approfondissements ultérieurs :

- **une meilleure différenciation des résultats par pratiques sylvicoles**. Au-delà du taux de prélèvement de bois et du plan de reboisement avec des essences productives pour S4, les modèles forestiers à grande échelle utilisés dans ce projet ne nous permettent pas de différencier les résultats par type de gestion sylvicole. C'est le cas de la surface des taillis, futaies régulières ou irrégulières, des surfaces des coupes rases, des durées de rotations, de surface de forêt en libre évolution… ;

- **une meilleure prise en compte des impacts du changement climatique sur les forêts**. Les modèles utilisés intègrent les effets directs du changement climatique (modification des précipitations et températures) mais pas les effets indirects induits par une augmentation des perturbations extrêmes (incendies, tempêtes, crises sanitaires). Il sera donc nécessaire d'évaluer la réponse des écosystèmes, selon leur mode de gestion, aux effets directs et indirects du changement climatique ;

- **une meilleure intégration des effets de la gestion forestière sur le carbone des sols dans les analyses**. Les projections n'intègrent pas les effets des évolutions des pratiques sylvicoles sur le stockage de carbone dans les sols, le puits dans le sol étant le même dans les différents scénarios indépendamment du mode de gestion. Cela constitue une limite importante car la matière organique des sols forestiers constitue un réservoir de carbone du même ordre de grandeur que celui de la biomasse. D'autres projets de recherche montrent que certains modes d'exploitation risquent de déstocker du carbone des sols, par exemple la récolte des menus bois et des souches, le travail du sol en plein avant plantation ;

- **une meilleure intégration des autres GES d'origine biogénique que le CO_2** ainsi que des paramètres biophysiques propres à la forêt (albédo et flux de chaleur) qui ont des effets refroidissants sur le climat local. Seuls les flux de CO_2 ont été modélisés. Les flux de méthane (CH_4) ou de protoxyde d'azote (N_2O) ne l'ont pas été. La combustion de la biomasse lors du brûlage en forêt des résidus de coupes ou des feux de forêts, ainsi que dans le chauffage au bois domestique, peut entraîner ce type d'émissions ;

- **une meilleure prise en compte des défrichements des forêts**. Les résultats présentés intègrent tous une augmentation de la surface forestière. En effet, en France métropolitaine, les surfaces des nouvelles forêts sont plus importantes que les surfaces déboisées par l'artificialisation des sols ou l'extension des terres cultivées. Cependant, les nouvelles surfaces forestières n'ont pas la même valeur écologique que les surfaces déboisées en termes de biodiversité, stocks de carbone… ;

- **une meilleure intégration des émissions de GES d'origine fossile**. Les résultats présentés intègrent uniquement les flux de carbone biogénique mais pas les consommations fossiles de la sylviculture. Avec le développement d'une sylviculture de plus en plus mécanisée, ces flux devraient être intégrés même si des études montrent que les ordres de grandeur restent bien inférieurs aux flux biogéniques ;

- **une meilleure intégration des effets de la gestion forestière sur la biodiversité et la fertilité des sols**. Le projet ne permet pas d'évaluer les impacts des scénarios de gestion simulés sur la qualité des sols ou la biodiversité ;

- **une meilleure prise en compte des effets des imports/exports**. Nous avons analysé dans ce travail uniquement le flux de carbone des forêts en France métropolitaine. Sachant que la balance commerciale de la filière bois est aujourd'hui déficitaire *(Graphique 4)*, une meilleure prise en compte des impacts de récolte de bois dans les forêts en dehors de la France est nécessaire ;

- **une meilleure répartition de la récolte entre les différentes catégories bois d'œuvre et bois industrie/bois énergie**. La répartition réalisée dans ce chapitre est liée à des critères techniques et aux marchés de bois actuels. En revanche, des évolutions technologiques ou des marchés pourraient permettre par exemple d'utiliser une proportion plus importante de bois feuillus dans le sciage pour bois d'œuvre. Des hypothèses dans ce sens ont été réalisées dans le chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* ;

- **une meilleure intégration des aspects sociaux** (ex. : vision de la société civile sur la gestion forestière, emplois, comportement des propriétaires forestiers et des consommateurs…) et **des analyses économiques des scénarios** de gestion envisagés (ex. : besoins d'investissement dans le tissu industriel, évolutions des prix du bois, incitations économiques dans le secteur sylvicole…).

- **améliorer la méthode de quantification et la visualisation des impacts des émissions biogéniques issues de la combustion du bois énergie et de la dégradation des produits bois en fin de vie**. Les émissions de CO_2 liées à la dégradation ou à la combustion des produits bois en fin de vie et du bois énergie sont comptabilisées dans le calcul du puits forestier. Pour éviter le double comptage, ces émissions ne sont pas comptabilisées dans le secteur de l'énergie ou de la construction. Cependant, il faut noter que les résultats des modèles montrent qu'augmenter la récolte de bois augmente les émissions biogéniques, sans augmenter au même rythme et dans les mêmes proportions l'accroissement biologique des forêts. Ainsi, le puits forestier se réduit. Pour rendre plus visibles ces impacts, nous pourrions améliorer les méthodes de comptabilisation des GES du secteur forestier en se basant sur la méthodologie utilisée pour les forêts gérées dans la comptabilisation du secteur UTCATF de l'inventaire national de GES. Il s'agirait de comptabiliser le puits forestier par rapport à un niveau de référence établi sur la base des pratiques et des niveaux de récolte de bois historiques. La comparaison entre le puits forestier estimé dans le scénario tendanciel et le puits estimé pour les scénarios d'évolution générerait des bilans positifs ou négatifs : un puits supérieur au scénario de référence serait à comptabiliser dans la partie séquestration de carbone et tout puits inférieur à la valeur du scénario de référence serait à comptabiliser dans la partie émissions de carbone car toute réduction du puits contribue à augmenter la quantité de carbone dans l'atmosphère. (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

7. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **ADEME**, *Les Forêts et les usages du bois*, 2021 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4647-forets-et-usages-du-bois-dans-l-attenuation-du-changement-climatique-9791029714498.html).

[2] **ADEME**, *Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières*, 2020 (https://www.ademe.fr/recolte-durable-bois-production-plaquettes-forestieres).

[3] **IGN, FCBA**, *Réévaluation de la ressource et de la disponibilité en bois d'œuvre des essences feuillues et conifères en France*, MAA et FBF, 2019 (https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/fcba_ign_etude_bo_france_rapport_version_revisee.pdf).

[4] **IGN, FCBA, ADEME**, *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*, 2016 (https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/2514-disponibilites-forestieres-pour-l-energie-et-les-materiaux-a-l-horizon-2035.html).

[5] **Roux A., Colin A., Dhôte J.-F., Schmitt B. (coord.) *et al.***, *Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique : entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie*, Versailles, éditions Quae, 2020, 170 pages (https://www.quae-open.com/produit/150/9782759231218/filiere-foret-bois-et-attenuation-duchangement-climatique).

[6] **Valade A., Bellassen V., Luyssaert S., Vallet P., Njakou Djomo S.**, *Bilan carbone de la ressource forestière française – Projections du puits de carbone de la filière forêt-bois française et incertitude sur ses déterminants*, 2017.

[7] **Du Bus de Warnaffe G. et Angerand S.**, *Gestion forestière et changement climatique, une nouvelle approche de la stratégie nationale d'atténuation*, Rapport d'étude, FERN, Canopée, 2020 (https://www.canopee-asso.org/wp-content/uploads/2020/02/Rapport-WEBfor%C3%AAt-climat-Fern-Canop%C3%A9e-AT_Optimizer.pdf).

[8] **CITEPA**, *Rapport National d'Inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques et du Protocole de Kyoto*, CCNUCC, 2021 (https://cdr.eionet.europa.eu/fr/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envyemsw/).

[9] **CITEPA**, *Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et forêt*, Rapport Secten, édition 2020, 2021 (https://www.citepa.org/wp-content/uploads/2.7-UTCATF_2020.pdf).

[10] **IGN**, *Le Mémento de l'inventaire forestier*, édition 2020, 2021 (https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2020.pdf).

[11] **IGN**, *Le Mémento de l'inventaire forestier*, édition 2019 (https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2019_web-2.pdf).

[12] **Agreste**, *Récolte de bois et production de sciages en 2018*, n° 360, décembre 2019 (https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Pri360/Primeur360.pdf).

[13] **MAA, IGN**, *Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines*, 2021 (https://foret.ign.fr/IGD/).

[14] **MTE, MAA, CITEPA, IGN**, « Plan Comptable Forestier National de la France incluant le Niveau de Référence pour les Forêts (FRL) pour les périodes 2021-2025 et 2026-2030 », 2020 (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan%20Comptable%20Forestier%20France.pdf).

[15] **Veille Économique Mutualisée, filière bois**, « Indicateurs du commerce extérieur », 2021 (https://vem-fb.fr/index.php/chiffres-cles/valeur-ajoutee-et-emploi).

[16] **Pellerin S., Bamiere L. (pilotes scientifiques) *et al.***, *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ?*, Rapport scientifique de l'étude, INRA (France), 2020, 540 pages.

8. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2018	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Récolte BO feuillus [Mm^3/an]	5,4	6,2	5,2	6,2	6,8	8,2
Récolte BO résineux [Mm^3/an]	14,6	16,8	14,5	16,8	19	21,1
Récolte BI (bois d'industrie) et BE (bois énergie) [Mm^3/an]	31,7	37,6	32,2	37,6	44,9	41,9
Récolte totale [Mm^3/an]	**51,8**	**60,7**	**51,9**	**60,7**	**70,7**	**71,1**
Puits forestier – *in situ* – biomasse vivante* [$MtCO_2$/an]	49,4	46	66,6	46	25,5	25,2
Puits forestier – *in situ* – sols* [$MtCO_2$/an]	6	6	6	6	6	6
Puits forestier – *in situ* – bois mort* [$MtCO_2$/an]	4,5	5,2	5,5	5,2	4,3	4,7
Puits forestier – *in situ* total* [$MtCO_2$/an]	**59,9**	**59,9**	**78,1**	**57,2**	**35,9**	**35,8**

* En considérant une augmentation de la surface forestière de 40 000 ha/an.

02 ÉVOLUTION DU SYSTÈME PRODUCTIF

3. Production industrielle

1. L'industrie, un enjeu majeur de la transition écologique
317

2. Rétrospective : des efforts de décarbonation de l'industrie encore insuffisants
327

3. Plan de relance et réglementations européennes : une nouvelle dynamique pour la décarbonation de l'industrie
330

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios
331

5. Stratégies pour le secteur selon chaque scénario
337

6. Des restructurations majeures s'avèrent inéluctables pour l'industrie
367

7. Des hypothèses à affiner en concertation avec les différents secteurs
369

8. Références bibliographiques
371

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur
372

1. L'industrie, un enjeu majeur de la transition écologique

1.1. L'industrie, un secteur à la croisée des enjeux environnementaux

Le **secteur industriel** désigne les activités économiques qui produisent des biens matériels par la transformation et la mise en œuvre de matières premières. En particulier, **l'industrie « lourde »** concentre l'ensemble des procédés qui consistent à transformer une matière première « naturelle » en un matériau brut, grâce à une consommation énergétique importante. Et, comme toute activité humaine, l'ensemble de ces transformations engendre des impacts (émissions de GES et polluants atmosphériques ou aqueux, production de déchets…).

Mais cette capacité de transformation pour produire des biens, essence même de l'activité industrielle, est aussi un élément clé dans les solutions identifiées pour la transition écologique :

- par la modification des procédés industriels eux-mêmes (recyclage, électrification…);
- ou par la fabrication de produits et équipements indispensables à la transformation écologique (matériaux isolants, équipements EnR, équipements de tri, installations de traitements d'effluents…).

C'est principalement ce premier aspect de l'industrie, sur ses propres procédés industriels, qui sera abordé dans cet exercice prospectif énergie-ressources, pour mettre en évidence les interactions entre les différents enjeux dans un objectif global de transition écologique, souvent résumé sous le terme « décarbonation de l'industrie ». Mais le deuxième aspect reste partie prenante de l'exercice dans la mesure où les niveaux de production et donc la nature de ces productions (matériaux, équipements…) sont les déterminants majoritaires de la contribution du secteur industriel à la transition écologique et à l'atteinte de la neutralité carbone.

L'INDUSTRIE, 4E SECTEUR LE PLUS ÉMETTEUR DE GES

L'industrie représente, en France, 13 % du PIB [1], mais est responsable de **17 % des émissions directes** de GES (75 $MtCO_2eq$ en 2018)[1] [2]. Elle est ainsi le quatrième secteur le plus émetteur en France, dans une ampleur comparable aux secteurs agricole et résidentiel-tertiaire.

Ces émissions directes sont constituées à 91 % de CO_2 (77 % liés à la **combustion** et 14 % à des réactions de **décarbonatation**, dans les procédés industriels[2]), 5 % de HFC et 4 % de N_2O et autres gaz[3]. Pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050, les trajectoires de la SNBC visent leur **réduction de 81 %** par rapport à 2015.

Outre les émissions directes, **l'importation de produits engendre des émissions hors du territoire français**. Dans le secteur de l'acier uniquement, les importations nettes d'émissions s'élèvent, en 2017, à 12 $MtCO_2eq$ environ, soit 1/6e des émissions directes de l'ensemble de l'industrie française[4]. Une étude portée par l'UNIDEN a évalué que la désindustrialisation que la France a connue entre 1995 et 2015 a impliqué une baisse des émissions directes françaises de 4,5 $MtCO_2eq$, compensée par une hausse des émissions importées de 6,8 $MtCO_2eq$. L'empreinte carbone française s'est donc accrue de 2,3 $MtCO_2eq$

1 Ce chiffre correspond aux émissions du secteur « Industrie manufacturière et construction » selon le périmètre CITEPA, à l'exception du sous-secteur « Construction ». Ce périmètre ne prend notamment pas en compte les émissions liées aux cokeries sidérurgiques. Pour plus de détails sur le périmètre des données utilisées dans la modélisation et dans ce rapport, voir *section 4 Description de la méthode et outils de quantification des scénarios*.

2 Les émissions de CO_2 de l'industrie sont principalement dues à la combustion de combustibles, mais les réactions chimiques des procédés industriels entraînent également des émissions non énergétiques (ou spécifiques). Par exemple, la production de ciment, de verre ou de chaux s'accompagne de réactions de décarbonatation dans lesquelles des carbonates (ex. : calcaire) sont transformés en CO_2.

3 GES considérés dans la Directive EU-ETS (Directive 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans l'Union européenne, ou SEQE-UE) : dioxyde de carbone (CO_2), protoxyde d'azote (N_2O), hydrocarbures perfluorés (PFC), méthane (CH_4), hydrocarbures fluorés (HFC) et hexafluorure de soufre (SF6).

4 Calcul d'après des données issues du Bilan National du Recyclage et d'une étude réalisée par Deloitte et l'UNIDEN [3].

(soit environ 3 % des émissions industrielles), en raison d'un système productif étranger globalement plus intense en émissions qu'en France [3]. Ces considérations, ainsi que les problématiques de sauvegarde des emplois ou de souveraineté, ravivées par la crise de la Covid-19, alimentent un débat autour des politiques industrielles et des dynamiques de relocalisation à l'aune des enjeux de décarbonation.

L'INDUSTRIE, 3E SECTEUR LE PLUS CONSOMMATEUR D'ÉNERGIE

L'industrie compte pour **22 % de la consommation d'énergie finale française** (366 TWh en 2016, hors usage en matière première)[5] [4]. **L'usage de combustibles représente deux tiers de ces consommations** (247 TWh), principalement pour alimenter des fours. Le tiers restant (119 TWh) correspond à des consommations électriques, alimentant essentiellement des moteurs (pompes, ventilation…).

En outre, les procédés industriels consomment **53 TWh de combustibles comme matières premières**, soit 13 % des consommations énergétiques totales de l'industrie[6]. Elles correspondent notamment à l'utilisation de dérivés pétroliers dans la pétrochimie, de coke dans la sidérurgie ou de gaz naturel pour la production d'ammoniac.

AUTRES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- **Prélèvements de matières**. En tant que transformatrice de matières, l'industrie est directement confrontée aux enjeux de disponibilité des ressources.

- **Prélèvements en eau**. Les industries, notamment de la chimie, de l'agroalimentaire et du papier-carton, représentent près de 10 % (environ 2 Gm³) des prélèvements d'eau nationaux en 2011, comparables à ceux de l'irrigation [5].

- **Rejets atmosphériques hors GES**. L'industrie est responsable d'une part significative des émissions nationales de certains métaux lourds (85 % du sélénium, 46 % du mercure, 45 % du chrome, 36 % du nickel, 41 % de l'arsenic), de substances liées à l'acidification (50 % du dioxyde de soufre) et de polluants organiques persistants (56 % des polychlorobiphényles). Elle rejette également des particules (14 % des PM_{10}) [2].

- **Rejets aquatiques**. Les polluants industriels de l'eau sont principalement constitués de métaux lourds, mais également de matières en suspension (MES) issues de la métallurgie et des industries extractives, ainsi que de matières oxydables (MO), issues notamment de l'industrie agroalimentaire.

- **Production de déchets**. L'industrie produit 8 % (environ 26 Mt) des déchets générés en France, mais 25 % (2,8 Mt) des déchets dangereux[7] [5].

- **Occupation des sols et sites pollués**. Les zones industrielles et commerciales n'occupent que 0,3 % (341 000 ha) du territoire français, mais les activités industrielles (notamment extractives) ont généré, au cours du temps, une importante pollution des sols : près de 6 000 sites (soit l'équivalent d'un tiers des sites industriels actuellement en activité) sont recensés comme pollués ou potentiellement pollués en 2015 [5].

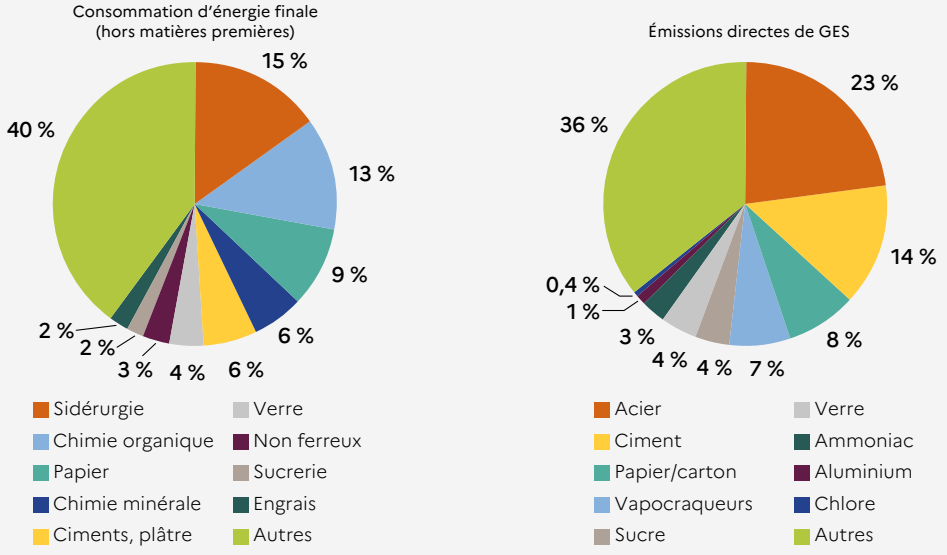
CONCENTRATION DES ÉMISSIONS : IMPORTANCE DES TRANSFORMATIONS DES SECTEURS DE L'INDUSTRIE LOURDE

Ce document se focalise plus spécifiquement sur les **neuf secteurs de l'industrie lourde à décarboner en priorité : sidérurgie** (acier), **cimenterie** (clinker et ciment), industries chimiques de l'**éthylène**, de l'**ammoniac** et du **dichlore**, **papeterie** (papier-carton), productions de **sucre**, **verre** et **aluminium**. Ils concentrent en effet deux tiers des émissions de GES de l'industrie. Ces secteurs ont en commun d'être particulièrement énergo-intensifs[8], concentrant 60 % des consommations énergétiques de l'industrie.

Cependant, chacun de ces neuf secteurs comporte des spécificités propres qui dépendent de nombreux paramètres : contraintes techniques, clients et fournisseurs, niveau et périmètre de concurrence internationale, intensité capitalistique… Décrire la trajectoire de décarbonation de l'industrie requiert donc de considérer individuellement chacune de leurs trajectoires sectorielles pour bien rendre compte de leur dynamique.

5 Ces chiffres ne prennent en compte ni les usages de combustibles comme matières premières, ni ceux destinés à l'autoproduction d'électricité : ils considèrent l'ensemble de l'électricité consommée sous forme d'énergie finale, qu'elle soit autoproduite ou non.
6 Les consommations énergétiques totales de l'industrie, qui s'élèvent à 420 TWh, incluent ici les usages de matières premières énergétiques mais ne prennent toujours pas en compte les usages de combustibles destinés à l'autoproduction d'électricité.
7 Chiffres 2012 incluant la « Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné ».
8 On parle d'Industries Grandes Consommatrices d'Énergie ou IGCE.

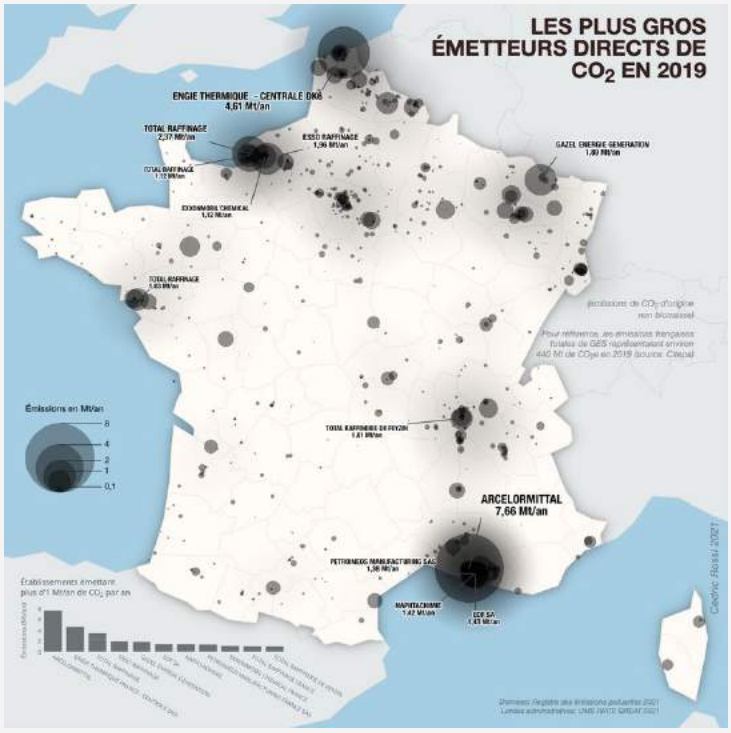
Graphique 1 *Poids de l'industrie lourde (IGCE) dans la consommation d'énergie et les émissions directes[9] de l'industrie*



Source : [4], [6].

Cette concentration des émissions sur quelques secteurs implique une concentration territoriale des émissions, renforcée par la présence de hubs industriels. Une grande partie des émissions se trouve ainsi concentrée sur quelques zones, notamment en région PACA (site de Fos-sur-Mer), dans les Hauts-de-France (site de Dunkerque), sur l'axe Seine, dans le Grand Est ou encore en Auvergne-Rhône-Alpes.

Figure 1 *Cartographie des établissements les plus émetteurs de CO_2 en France métropolitaine*



Source : [7].

9 Le Plan de Transition Sectoriel du Ciment publié par l'ADEME (https://finance-climact.fr) présente une part de 12,5 % des émissions directes de l'industrie cimentière dans les émissions industrielles françaises et non de 14% comme présenté ci-dessus. Le faible écart provient de plusieurs éléments : années différentes, sources différentes donc, périmètre et comptabilité différents (CO_2 biogénique…).

Les industries lourdes fournissent, en outre, une grande partie des intrants du reste du tissu industriel, aux émissions moindres et plus diffuses mais dont les enjeux socio-économiques sont primordiaux. Si l'industrie lourde représentait environ 160 000 emplois directs en 2009, les effectifs ont chuté de 12,5 % dix ans après, soit 140 000 emplois directs en 2019 répartis sur un peu moins de 1 800 établissements[10]. Ces effectifs salariés en équivalents temps plein représentent environ 5 % du total de l'industrie manufacturière et 1 % des établissements. Plus diffus, le reste du tissu industriel concentre en revanche 95 % des effectifs et 92 % de la valeur ajoutée[11].

UNE TRANSFORMATION DE L'INDUSTRIE DÉPENDANTE DE L'ÉVOLUTION DE TOUS LES SECTEURS DE L'ÉCONOMIE

Situées en amont des chaînes de valeur, les mutations de l'industrie lourde dépendent largement des secteurs aval, notamment du BTP, des transports, de la production d'emballages ou d'engrais. La transformation de l'industrie est donc, pour une grande part, exogène : la demande intérieure et extérieure en matériaux et biens manufacturés, les substitutions de produits, les normes de qualité relatives à l'incorporation de matière recyclée affectent directement les niveaux et modes de production industrielle.

L'offre énergétique disponible pour l'industrie dépend également des besoins exprimés dans d'autres secteurs et donc de la concurrence sur les énergies décarbonées.

Par ailleurs, certains secteurs industriels comme la pétrochimie évoluent dans un environnement particulièrement interdépendant. Dans le cadre d'un abandon des énergies fossiles dans les transports, le maintien de raffineries pourrait ne pas être assuré. Or, le naphta, qui est l'intrant principal de la filière plastiques (produits à partir d'éthylène), est un coproduit des raffineries. Si elles fermaient, une restructuration de la filière pétrochimie deviendrait alors nécessaire (*cf.* *section 5.6*, encadré *Focus sur la chimie des plastiques*).

UNE FISCALITÉ SUR L'ÉNERGIE ET LE CARBONE ORIENTÉE PAR DES CONSIDÉRATIONS AUTOUR DE LA COMPÉTITIVITÉ PLUS QU'AUTOUR DES ENJEUX DE DÉCARBONATION

Les acteurs industriels énergo-intensifs sont particulièrement affectés par les coûts de l'énergie. Ils bénéficient actuellement de dispositions pour préserver leur compétitivité vis-à-vis de l'international, en particulier pour ceux classés comme « exposés à un risque important de fuite carbone » (exonérations ou réductions de taxes énergétiques comme les TICPE/TICC/TICGN, quotas gratuits dans le cadre de la Directive EU-ETS, etc.).

L'industrie cimentière : un exemple de secteur concentré fortement émetteur

- **Émissions de GES**. L'industrie cimentière française émet, chaque année, 10 $MtCO_2eq$, soit 12,5 % des émissions de GES de l'industrie et 2 % des émissions totales en France. Deux tiers de ces émissions ne sont pas d'origine énergétique mais proviennent des procédés (calcination du calcaire).
- **Consommation d'énergie**. Les consommations énergétiques de l'industrie du ciment pèsent pour 30 % des coûts de production.
- **Concentration des enjeux**. L'industrie comporte 27 sites de calcination appartenant à cinq groupes industriels. Elle représente 5 000 emplois directs ainsi que 18 000 emplois indirects.

Pour plus d'informations : voir le Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière, à retrouver sur finance-climact.fr [8] [9].

10 L'estimation est basée sur les données ACOSS-URSSAF et la sélection des codes d'Activité Principale Exercée telle que correspondant au périmètre de l'industrie lourde mentionné dans le document : sidérurgie, cimenterie, industries chimiques de l'éthylène, de l'ammoniac et du dichlore, papeterie (papier-carton), productions de sucre, verre et aluminium.

11 L'estimation est basée sur les données Esane (Élaboration des statistiques annuelles d'entreprises) de 2017 en comparant la valeur ajoutée totale de l'industrie manufacturière et celle provenant de la sidérurgie, de la « production de métaux précieux et d'autres métaux non ferreux », ainsi que des fabrications de « pâte à papier, de papier et de carton », de « produits chimiques de base, de produits azotés et d'engrais, de matières plastiques de base et de caoutchouc synthétique », de « verre et d'articles en verre » et de « ciment, chaux et plâtre ».

1.2. Cinq transformations majeures pour répondre à l'urgence environnementale

Les enjeux de décarbonation de l'industrie s'articulent principalement autour de cinq transformations du secteur.

1RE TRANSFORMATION : ADAPTABILITÉ À L'ÉVOLUTION DES NIVEAUX DE PRODUCTION

Les niveaux de production sont les principaux déterminants des émissions de l'industrie. Liés à la demande domestique comme internationale (et donc fortement dépendants des actions de sobriété mises en place), leur réduction constitue une forme de décarbonation exogène ou « subie » de l'industrie. Elle requiert cependant des évolutions structurelles afin de s'y adapter : par un maillage industriel efficient et dimensionné aux besoins, un soutien à la compétitivité et la réorganisation des emplois et formations.

Pour autant, une réindustrialisation partielle de la France, qu'elle soit forcée par l'évolution des équilibres internationaux ou choisie, pour des enjeux de souveraineté ou de réappropriation de l'empreinte carbone nationale pourra également intensifier certains niveaux de production. Requérant une décarbonation des sites additionnels et existants, cette dynamique impliquerait, outre les défis d'adaptabilité, le renforcement des transformations ci-après.

2E TRANSFORMATION : RÉDUCTION DE L'EMPREINTE MATIÈRE

Le développement d'intrants matières alternatifs permet de réduire l'empreinte environnementale de la production industrielle, à travers :

- l'incorporation de matière recyclée, par l'utilisation de ferraille en métallurgie, de calcin recyclé dans l'industrie du verre, de papier recyclé dans l'industrie du papier-carton… ;
- la modification des intrants, par l'utilisation d'autres ressources à empreinte environnementale réduite (substitution au clinker dans l'industrie cimentière, utilisation de matériaux biosourcés…).

Ces substitutions requièrent des transformations techniques et organisationnelles pour développer de nouvelles filières d'économie circulaire, améliorer les procédés d'incorporation des matériaux et de recyclage (notamment chimique et biologique) et rendre les intrants alternatifs compétitifs, en qualité et en coût, face aux matières vierges existantes.

3E TRANSFORMATION : AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

L'amélioration de la performance énergétique des technologies et des procédés permet de réduire les consommations énergétiques de l'industrie. Chaque secteur industriel présente des spécificités, avec des potentiels, leviers et maturités propres pour ses installations cœur de procédés. Mais il existe aussi tout un panel de technologies transversales, que l'on retrouve dans la majorité des secteurs industriels, au-delà des neuf secteurs énergo-intensifs, notamment pour les utilités (groupe froid, moteurs, chaudières, pompes à chaleur). Ce gisement transverse s'élèverait à près de 62,2 TWh, dont 27 TWh pour les combustibles et 35 TWh pour l'électricité [10]. En outre, la valorisation de chaleur fatale[12] offrirait un gisement de plus de 100 TWh, dont plus de la moitié à une température supérieure à 100 °C [11].

4E TRANSFORMATION : SUBSTITUTIONS AUX ÉNERGIES CARBONÉES

La modification du mix énergétique permet de réduire les émissions liées à l'usage d'énergie, notamment pour la production de chaleur (vapeur, eau chaude…), qui représente deux tiers des consommations. Elle est notamment permise par le développement des énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire thermique…). Les usages thermiques de l'électricité, encore peu développés, peuvent également être étendus, notamment dans la sidérurgie (fours à arc) ou la production de verre (fours verriers) [12], mais aussi sur des applications plus diffuses[13]. Un premier gisement technique est ainsi estimé à 18 % de la consommation de combustibles pour les process thermiques en 2014, soit 41,6 TWh [13].

Selon les caractéristiques propres à chaque secteur (besoin en température, proximité de potentiels renouvelables…), différentes énergies de substitution peuvent être utilisées [13]. Ces transformations placent l'industrie en interaction avec le système énergétique et sont donc modulées en fonction des demandes énergétiques des autres secteurs de l'économie.

12 Appelée également chaleur de récupération.
13 L'électricité représente 32 % de l'énergie finale consommée par l'industrie en 2015, mais est utilisée à 71 % dans des moteurs (pompes, ventilation, froid…).

5E TRANSFORMATION : CAPTAGE, STOCKAGE ET VALORISATION DES ÉMISSIONS RÉSIDUELLES

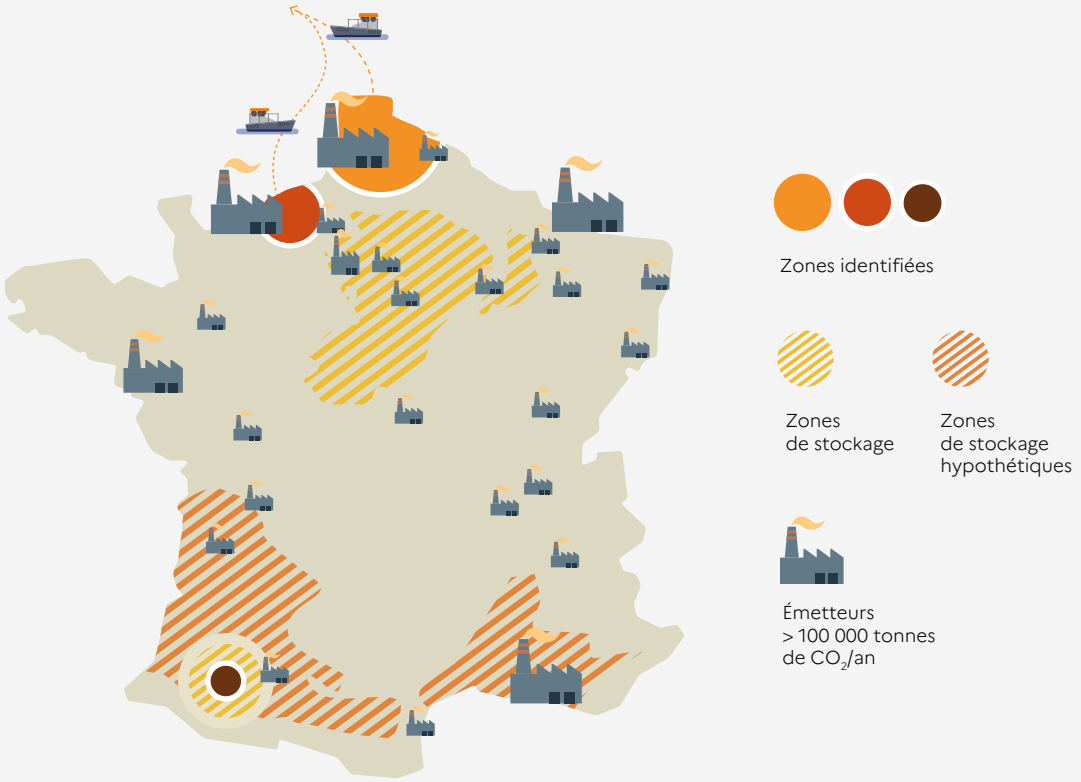
Dans les cas où une décarbonation complète de l'activité industrielle ne peut être atteinte – en particulier pour les émissions issues de réactions chimiques (calcination par exemple) – des technologies de captage, stockage géologique et/ou valorisation de CO_2 pourront être mises en place.

Pour autant, le stockage géologique de CO_2 reste dépendant de la proximité de capacités *onshore* (à terre) ou *offshore* (en mer), de sa viabilité technico-économique ainsi que d'éventuelles résistances locales vis-à-vis des installations.

Le potentiel de décarbonation permis par la valorisation du CO_2 est, de plus, à moduler selon les voies de valorisation sélectionnées (carburants, produits chimiques, matériaux de construction…) : certaines peuvent aboutir à la réémission de tout ou partie du CO_2 capté, quasi immédiatement (ex. : combustion des carburants) ou à plus long terme [14].

Ces technologies ne visent pas à atteindre des émissions négatives : elles sont des solutions de réduction des émissions fossiles. Au total, le gisement de décarbonation lié au CCS (*carbon capture and storage*) est estimé aujourd'hui à 24 Mt de CO_2 par an [15].

Figure 2 *Carte du potentiel de captage et stockage géologique de CO_2 (CCS) en France*



Hauts-de-France (Dunkerque) **15 MtCO_2/an**

(+) Possibilité de stockage offshore (avec la mer du Nord)
Gros volumes de CO_2 pour la mise en place d'infrastructures de transport de CO_2

(−) Verrou réglementaire à lever sur la possibilité d'exporter les émissions de CO_2 hors du territoire et par bateau
Coût minimal estimé à 100 €/t CO_2

Normandie (Le Havre-Rouen) **6 MtCO_2/an**

(+) Interconnexion avec le hub CO_2 de Dunkerque pour stockage offshore (avec la mer du Nord)
Gros volumes de CO_2 pour la mise en place d'infrastructures de transport de CO_2

(−) Verrou réglementaire à lever sur la possibilité d'exporter les émissions de CO_2 hors du territoire et par bateau
Coût minimal estimé à 125 €/t CO_2
Pérennité des sites (secteurs industriels qui seront impactés par la transition énergétique)

Nouvelle-Aquitaine (Lacq) **3 MtCO_2/an**

(+) Infrastructures existantes (ancien gisement de gaz)
Coût minimal estimé à 88 €/t CO_2

(−) Faible volume de CO_2
Zone de stockage onshore

FOCUS

L'industrie cimentière : exemples de leviers de décarbonation

Le plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière, réalisé par l'ADEME dans le cadre du programme européen LIFE (projet Finance ClimAct), identifie cinq leviers pour la décarbonation du ciment.

Leur mise en place pourrait permettre une décarbonation du secteur à hauteur de 54 % d'ici à 2050 en mobilisant des investissements à hauteur de 4,4 milliards d'euros, dont les trois quarts seraient à mobiliser lors des dix prochaines années.

- **Levier 1 – *Upgrading***
  Dans le jargon de la profession, l'*upgrading* est le fait de rénover une ancienne cimenterie en une nouvelle plus performante fonctionnant sur le procédé le plus efficace connu à ce jour. Ce levier de décarbonation est donc uniquement une mesure d'efficacité énergétique.

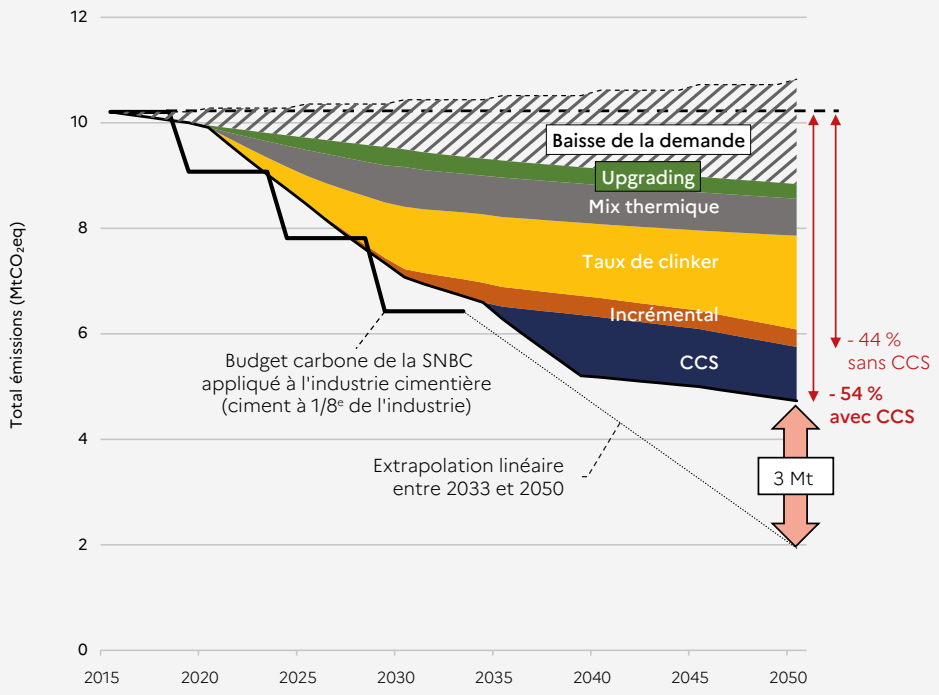
- **Levier 2 – Mix thermique**
  La consommation d'énergie représente environ ⅓ des émissions d'une cimenterie. Celles-ci peuvent être réduites en substituant les combustibles fossiles (charbon et coke de pétrole) par des combustibles moins carbonés intégrant une fraction de biomasse.

- **Levier 3 – Taux de clinker**
  Le clinker est un matériau intermédiaire qui rentre dans la composition finale du ciment et dont la production représente l'essentiel des émissions d'une cimenterie. Le fait de produire des ciments avec une plus faible teneur en clinker revient à produire moins de clinker et donc à réduire les émissions.

- **Levier 4 – Incrémental**
  La catégorie « incrémental » regroupe une gamme de sept technologies plus ou moins communément utilisées dans le secteur qui peuvent contribuer par petites touches à la décarbonation de l'outil de production, de façon « incrémentale ».

- **Levier 5 – Captage et stockage géologique de CO_2 (CCS)**
  Cette technologie, encore non déployée à l'échelle industrielle, vise à piéger le CO_2 dans une formation géologique imperméable et peut donc théoriquement abattre la quasi-totalité des émissions d'un site. Elle consiste d'abord à capter, purifier et concentrer le CO_2 issu des sites industriels pour ensuite pouvoir le transporter vers un lieu de stockage.

Graphique 2 Évolution des émissions de gaz à effet de serre du secteur cimentier à l'horizon 2050 – scénario SNBC/ADEME



Pour plus d'informations : voir le Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière, à retrouver sur finance-climact.fr [8].

1.3. Des freins et des leviers pour la transition

Tableau 1 Les freins et les leviers pour la transition

FREINS	LEVIERS
Une lente progression des plafonds technologiques Les technologies disponibles sont insuffisantes pour l'atteinte des niveaux de décarbonation souhaités dans la SNBC (- 81 % pour l'industrie). Par exemple, dans le secteur du ciment, les leviers techniques disponibles ou déjà identifiés ne permettent une décarbonation qu'à hauteur de 54 % des émissions actuelles[14].	**Accentuation des efforts en RDI** Les efforts en Recherche, Développement et Innovation (RDI) pourraient permettre de faire émerger des technologies de rupture.
Des arbitrages décidés *in fine* par les acteurs économiques, souvent à l'échelle internationale En dépit des forts risques environnementaux pesant sur les activités industrielles, les arbitrages financiers réalisés actuellement restent principalement guidés par les enjeux de compétitivité « classiques ». Les décisions d'investissement favorisent les projets les plus rentables à court terme, pouvant mettre en concurrence des sites d'un même groupe appartenant à différents territoires ou pays. Cette dynamique peut alors favoriser la délocalisation des activités industrielles vers les zones à moindre contrainte environnementale.	**Mutation des stratégies d'entreprises** Une prise en compte des enjeux climatiques et de long terme dans la stratégie des entreprises émerge. Elle devra impérativement se développer largement pour arbitrer en faveur d'investissements bas carbone et répondre aux exigences croissantes des partenaires financiers. **Prise de conscience des citoyens et des pouvoirs publics** La tendance actuelle des pouvoirs publics et des citoyens vers davantage de souveraineté industrielle est susceptible d'inverser les dynamiques de désindustrialisation. Dans ce cadre, il sera indispensable d'adjoindre une ambition environnementale à ces politiques de relocalisation ou de réindustrialisation.
Une prise de risque pour les industries lourdes La modernisation des sites de l'industrie lourde énergo-intensive est synonyme de prises de risques pour les acteurs ; elles sont en effet porteuses : • d'importants **coûts en CAPEX**[15], d'autant que certaines transformations peu rentables sont des prérequis à d'autres évolutions innovantes plus efficaces ; • de **modifications du marché**, du fait du développement de nouveaux produits « bas carbone » ; • de **transformations radicales des outils de production**, requérant la mise en place de démonstrateurs de taille réelle ; • d'enjeux de **montée en compétence** des professionnels pour la maîtrise de ces nouveaux outils.	**Mutation des modèles économiques** De nouveaux modèles économiques privilégiant la qualité à la quantité (ex. : économie de la fonctionnalité) pourront accompagner les réductions de la demande de l'industrie lourde, bien qu'ils soient plus aisés à mettre en œuvre dans l'industrie aval. **Soutien aux investissements et à la prise de risque** Pour autant, un accompagnement externe par les acteurs financiers et les pouvoirs publics sera également nécessaire pour mener à bien les mutations de l'industrie lourde. En particulier, une intensification de la **commande publique** de produits bas carbone pourra sécuriser les débouchés industriels. Ces aides pourront également concerner l'industrie aval. **Un soutien à l'offre des équipementiers** pourra notamment favoriser les transformations transverses, réplicables dans plusieurs secteurs industriels.
Une capacité d'investissement temporellement contrainte Les faibles marges des industries, notamment énergo-intensives, requièrent d'opérer les investissements nécessaires sur des **cycles longs** pour permettre leur amortissement. Cette situation est d'autant plus criante dans un contexte de concurrence nationale ou internationale entre sites, y compris au sein d'un même groupe industriel. Par conséquent, **des émissions restent « verrouillées »** entre deux cycles. Une rénovation peu ambitieuse ou rendue obsolète – sinon incompatible – avec l'apparition de nouvelles technologies[16] crée alors des infrastructures durablement sous-performantes par rapport aux meilleures technologies disponibles (MTD) et induit un vieillissement du parc. En outre, le temps de **développement des innovations** peut être particulièrement long, approchant, par exemple, les dix ans pour les technologies de captage et stockage géologique de CO_2.	**Planification des investissements** Une planification des investissements à venir est requise pour maximiser le potentiel de décarbonation lors des prochains cycles et tirer profit des synergies entre technologies. Une démarche prospective peut permettre d'anticiper l'évolution du paysage technologique en cohérence avec les mutations des autres acteurs économiques. **Soutiens financiers** Les cycles d'investissement pourront être raccourcis grâce au soutien des acteurs publics et financiers, requérant une planification des fonds à mobiliser en cohérence avec les besoins de transformation des industries.

14 Voir le Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière, à retrouver sur finance-climact.fr [8].
15 Dépenses d'investissement (*Capital Expenditures*).
16 Par exemple, une rénovation d'optimisation thermique peut être rendue obsolète dans le cadre d'une stratégie d'électrification.

Un besoin de visibilité long terme dans l'évolution des conditions économiques, fiscales et règlementaires

Les entreprises n'ont pas toujours un **intérêt économique immédiat** à engager les chantiers de décarbonation. Dans le contexte concurrentiel et règlementaire actuel, les transitions requises pourraient accentuer les difficultés économiques rencontrées aujourd'hui par certains industriels, caractérisées par des marges réduites et une perte de compétitivité[17].

Un cadre règlementaire ambitieux mais restreint à une échelle nationale ou européenne présente, par ailleurs, le risque d'intensifier les **fuites de carbone** par la délocalisation des industries françaises dans des pays à plus faible fiscalité carbone. En effet, les dépenses liées à la décarbonation de l'industrie, sous forme d'investissements, d'achats d'énergies et matières décarbonées[18], de taxes ou de crédits carbone, confrontent le secteur à un risque de *dumping* environnemental.

Implication des pouvoirs publics pour assurer une visibilité de long terme des entreprises

- Des mesures harmonisées peuvent être prises à l'échelle sectorielle, nationale ou européenne afin de fixer un prix du carbone – explicite ou implicite – tel que la mise à niveau des industries devienne économiquement avantageuse.

  Surtout, afin de limiter les prises de risques des acteurs de l'industrie, **une forte visibilité et fiabilité des trajectoires des prix du carbone et de l'énergie est requise** pour qu'elles soient intégrées dès les prochains cycles de modernisation.

  Ces mesures peuvent prendre la forme :
  - de **réglementations par la norme** ciblant les installations les plus émissives ou leurs secteurs aval (ex. : RE2020 dans le secteur du bâtiment) ;
  - d'un **signal-prix du carbone**, *via* des dispositifs tels que le système européen d'échange de quotas (SEQE-UE) ou des mécanismes de subventions, de taxes ou de bonus-malus[19].

- En outre, les potentiels écarts de compétitivité, notamment à l'international, peuvent justifier la mise en place :
  - de **dispositifs d'ajustement carbone**, sous la forme d'accords internationaux, de taxes sur le contenu carbone des produits importés ou d'un mécanisme d'inclusion carbone (échange transfrontalier de quotas carbone) ;
  - de **renégociations des accords** commerciaux et industriels à l'échelle européenne et internationale.

Une défiance des citoyens

La décarbonation de l'industrie est associée à des problématiques d'adhésion aux transitions à mener.

- La transition de l'industrie requerra une réduction volontaire de la consommation ou une baisse de la disponibilité – voire un renchérissement – de certains produits industriels. Ces évolutions présentent deux risques majeurs :
  1. un **rejet de la part des citoyens** désireux de maintenir leur niveau de consommation ;
  2. une accentuation **des inégalités sociales** face aux potentielles hausses de prix des produits industriels.

- La restructuration du paysage industriel pourra conduire à des **pertes ou transferts d'emplois** à l'origine de possibles tensions sociales.

- L'implantation d'installations industrielles nécessaires à la décarbonation pourra être contestée du fait de craintes liées aux **nuisances environnementales** ou aux risques d'accident (effets *NIMBY – Not In My Backyard*). Ce pourrait, par exemple, être le cas pour la constitution de hubs industriels ou pour le déploiement du CCS, au regard des risques technologiques et sanitaires potentiels.

Implication des citoyens dans les stratégies de décarbonation de l'industrie

L'adhésion de la société aux transitions industrielles nécessite :

- de sensibiliser et former les citoyens, salariés et syndicats aux enjeux de la transition écologique de l'industrie ;
- d'impliquer les citoyens, salariés et syndicats dans la définition des politiques industrielles de décarbonation (futurs souhaitables) jusqu'à la mise en œuvre des projets locaux.

Accompagnement public de l'évolution des emplois et compétences

Des politiques pour l'emploi, la formation et l'aménagement du territoire pourront être pensées afin d'accompagner l'évolution des compétences sur les nouvelles technologies et permettre de tirer profit des éventuels bassins d'emplois autour de nouveaux hubs industriels.

Attention portée à la justice sociale

Des mécanismes de compensation (mesures redistributives) devront être mis en place pour limiter le creusement des inégalités sociales et territoriales potentiellement induit par les transformations de l'industrie.

17 La répercussion des investissements dans les prix à l'aval est rendue difficile dans les secteurs fortement concurrentiels.
18 La disponibilité en énergie et vecteurs décarbonés pourra se réduire avec l'abandon progressif des énergies fossiles et/ou nucléaire et l'augmentation de la consommation de certains vecteurs. L'industrie pourra alors se trouver en concurrence avec d'autres secteurs pour s'alimenter en énergie et matières premières énergétiques, matérialisée par une augmentation du coût des ressources de substitution (hydrogène renouvelable, biomasse…). La production d'énergie sur site pourra, de plus, être limitée par le coût du foncier.
19 Les mesures incitatives doivent cependant être considérées en cohérence avec les exonérations de taxes sur les produits énergétiques (TICGN, TICC, TICPE) dont bénéficient les installations énergo-intensives.

AUTRES CONDITIONS DE SUCCÈS

Adopter une approche territoriale

La répartition géographique des industries prend une place importante dans leur décarbonation.

- Dans une logique d'écologie industrielle et territoriale (EIT), la constitution de **hubs industriels** permet la mutualisation de matières premières, d'énergie et d'infrastructures. C'est particulièrement le cas pour la récupération de chaleur *via* un réseau de chaleur entre acteurs industriels d'un même site. Similairement, la production d'hydrogène est associée à des infrastructures de production, de distribution et de stockage qui peuvent être mutualisées autour des industries consommatrices (raffinerie, production d'engrais azotés…) et de flottes de mobilité hydrogène captives.

- La mise en place d'infrastructures de **captage et stockage géologique de CO_2** est fortement liée aux spécificités géologiques des territoires et doit être associée à des gisements concentrés en émissions. Seules trois zones disposent, à l'heure actuelle, d'un potentiel en France *(Figure 2)*. Selon les évolutions de la répartition géographique des installations émissives, du contexte local autour des sites de stockage et des coûts associés, ces potentiels territoriaux pourront être modifiés.

- Pour les industries moins intensives en carbone, **une relocalisation de la production au plus près de la consommation** peut être considérée. À l'inverse des orientations précédentes, celle-ci tendrait à décentraliser l'activité industrielle sur le territoire national.

Organiser l'accès aux différents vecteurs énergétiques décarbonés

Dans le cadre de la transition écologique, l'accès à l'énergie décarbonée pourra être concurrentiel entre les différents usages finaux, requérant des arbitrages et optimisations entre secteurs consommateurs.

Par exemple, si une partie du chauffage urbain peut être assurée par l'usage de biomasse, cette énergie trouve une utilité plus importante dans l'industrie, qui requiert un apport de chaleur à haute température. Un réseau de chauffage urbain, dont les besoins en température peuvent se limiter à 60 °C[20], peut alors être alimenté par la récupération de chaleur fatale provenant des chaudières industrielles.

À l'inverse, l'usage de produits biosourcés pourra, par exemple, être réduit afin de prioriser les puits naturels ou l'usage de biomasse à des fins alimentaires.

Considérer les enjeux non climatiques

La transition écologique du secteur industriel est surtout gouvernée par les objectifs de décarbonation. Ces objectifs peuvent cependant conduire à déconsidérer voire aggraver les autres problématiques environnementales (préservation de la biodiversité, de l'eau, des sols…).

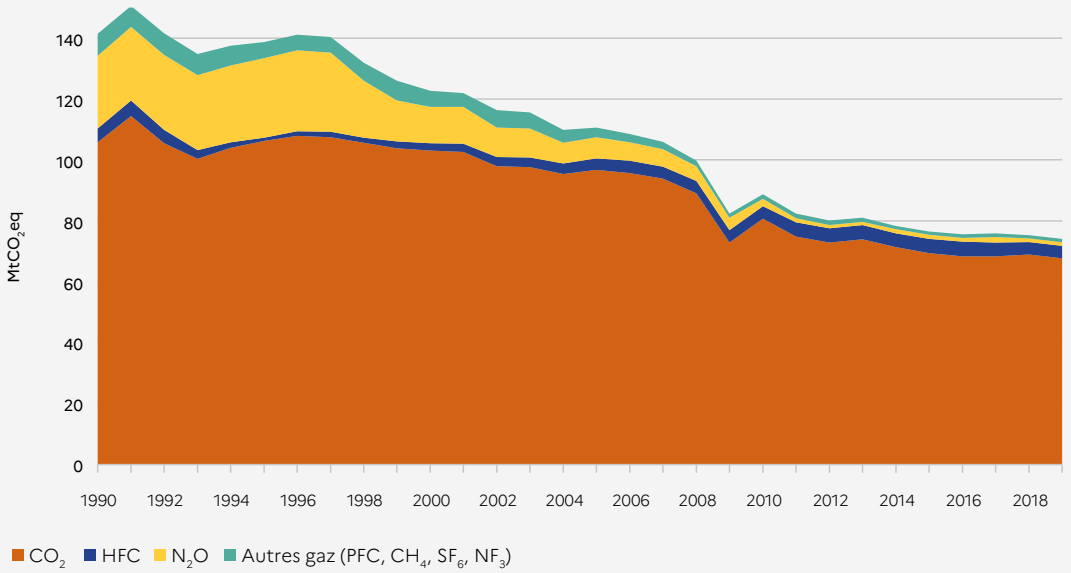
20 La distribution de chaleur à basse température (60 à 90 °C) est permise par le développement des quartiers basse consommation, la rénovation thermique des bâtiments et l'essor des émetteurs basse température (ex. : planchers chauffants).

2. Rétrospective : des efforts de décarbonation de l'industrie encore insuffisants

UNE BAISSE DES ÉMISSIONS FORTEMENT IMPACTÉE PAR LES NORMES SUR LES ÉMISSIONS N_2O

Le secteur de l'industrie a émis 75 $MtCO_2eq$ en 2018, soit 17 % des émissions nationales. Ces émissions ont fortement baissé entre 1990 et 2018 (- 47 % sur la période), en raison notamment des réglementations sur l'usage des N_2O et de la décarbonation du mix énergétique (principalement *via* le remplacement de produits pétroliers par du gaz naturel). La décarbonation de l'industrie ralentit néanmoins légèrement depuis 2011, et suit le niveau de consommation énergétique. Le rythme de réduction annuel moyen des émissions s'élève à - 1,3 % par an sur la période 2011-2019, contre - 2,3 % par an sur 1990-2010. En comparaison, les objectifs fixés par la SNBC représentent un rythme d'environ - 4,6 % par an entre 2015 et 2050.

Graphique 3 Évolution des émissions industrielles, par GES (1990-2019)[21]



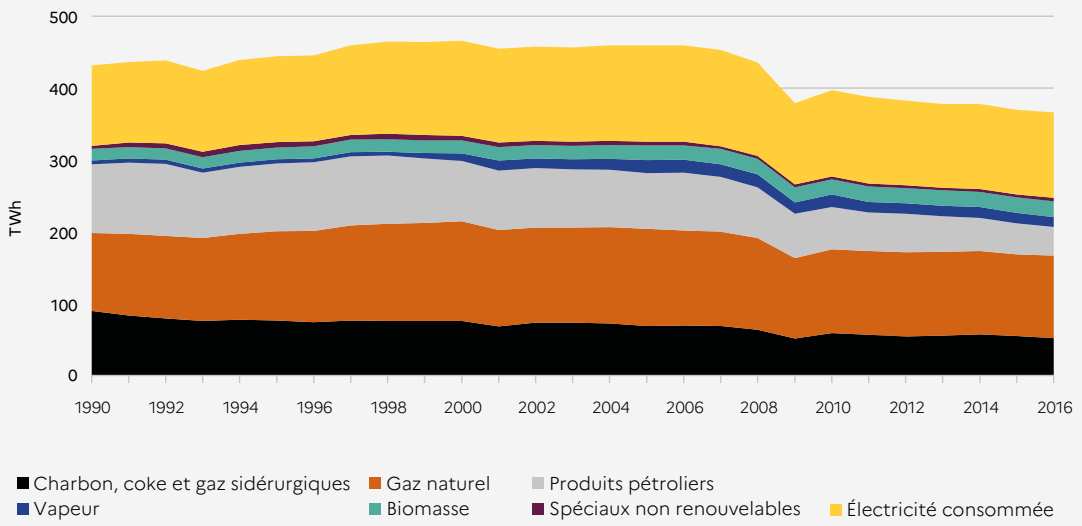
Source : [2].

21 Données « Industrie manufacturière et construction » avec soustraction du poste « Construction ».

UNE ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE CORRÉLÉE À L'ACTIVITÉ ÉCONOMIQUE

Entre 1990 et 2000, la consommation d'énergie de l'industrie a augmenté et s'est stabilisée au milieu des années 2000, puis a fortement chuté en 2009-2010 du fait de la crise économique. En 2016 les niveaux de consommation d'énergie du secteur sont toujours en deçà des niveaux antérieurs à la crise, avec au total un recul de 15 % par rapport à 1990.

Graphique 4 Évolution de la consommation d'énergie (hors matières premières) de l'industrie, par vecteur (1990-2016)



Source : [4].

PRINCIPAUX DÉTERMINANTS DE LA VARIATION DE CONSOMMATION D'ÉNERGIE

1. **La baisse des volumes produits** est l'un des principaux moteurs de la réduction des consommations énergétiques, particulièrement à la suite de la crise économique de 2008. Chaque secteur industriel montre cependant des évolutions spécifiques.

   Dans les secteurs énergo-intensifs, la production en volume a diminué d'environ 10 à 25 % sur les dix dernières années, à l'exception des secteurs du sucre (+ 30 %) et de l'aluminium (+ 10 %).

   Ces variations de production s'expliquent par les variations de demande domestique, mais aussi par les évolutions du commerce international. En effet, à l'exception du clinker (bien que les tendances récentes laissent une place plus grande aux importations), tous ces matériaux font l'objet à la fois d'importations et d'exportations, notamment au sein de l'Union européenne.

2. Un effet de structure a également pu réduire la consommation énergétique dans le cas où certaines productions ont subi une **réorientation dans des produits moins énergivores**.

3. Enfin, **l'intensité énergétique s'est améliorée de près de 40 %** [16] depuis 1990 et figure parmi les principaux leviers de décarbonation des émissions industrielles.

   La pénétration de l'efficacité énergétique est cependant restée limitée, en raison de la baisse des quantités produites qui induit souvent une dégradation des performances énergétiques, mais également de l'allocation de quotas gratuits dans le cadre du SEQE-UE, limitant l'effet incitatif du dispositif.

ÉVOLUTION DU MIX ÉNERGÉTIQUE

Le mix énergétique industriel s'est principalement décarboné grâce à un remplacement de l'usage de produits pétroliers (PP) par du gaz naturel, probablement en lien avec le développement et le renforcement des réglementations sur les émissions industrielles. La consommation de charbon s'est également réduite sous la poussée des normes relatives à la qualité de l'air. En outre, les usages d'électricité, d'énergies renouvelables (notamment thermiques) et de déchets s'intensifient, bien qu'ils restent encore minoritaires.

Le mix énergétique de l'industrie reste ainsi fortement carboné, notamment par l'usage de charbon et de fioul. Le maintien de ces vecteurs s'explique par leur faible coût, mais également en raison du manque de connexion de certains sites industriels au réseau de transport ou de distribution de gaz naturel. Par ailleurs, la consommation de charbon reste prégnante, notamment en sidérurgie où il est utilisé en tant que matière première.

PROGRÈS D'EFFICACITÉ MATIÈRE

La structuration de filières de recyclage (filières à responsabilité élargie du producteur – REP) a permis de réaliser des progrès d'efficacité matière. Pour autant, cette problématique ne s'impose comme sujet de décarbonation que depuis le milieu des années 2010 et le développement de l'écoconception. En 2017, 60 Mt de matières recyclées ont été incorporées dans les procédés de fabrication, dont 43 Mt de granulats du BTP et 17 Mt de matériaux dans l'industrie (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*).

Captage, stockage et valorisation du CO_2 – des avancées R&D en attente d'un déploiement à l'échelle industrielle

Les **technologies CCS** ont connu un fort développement R&D dès la fin des années 1990, permettant la réalisation de démonstrateurs dans les années 2010. Pour autant, aucun projet n'a été développé en France à échelle industrielle. Parmi les difficultés rencontrées, les fortes oppositions sociétales, doublées de l'écroulement du prix du carbone sur les marchés du SEQE-UE, ont conduit à l'arrêt des projets en cours en Europe.

Pour autant, depuis la signature des accords de Paris en 2015, les technologies CCS connaissent un regain d'intérêt. Dans un contexte de contrainte carbone croissante (prix du quota atteignant 58,39 euros en juillet 2021) et de développement de sites de stockage géologique *offshore* (principalement en mer du Nord), de nouvelles initiatives se structurent en France autour de ces technologies. Les perspectives de développement visent notamment à en diminuer la pénalité énergétique, à en réduire les coûts et à identifier de nouveaux sites de stockage *onshore*.

La **valorisation du CO_2** (ou CCU) consiste à capter le CO_2 pour l'utiliser comme matière première directe ou pour la synthèse de carburants, produits chimiques ou matériaux. Ces technologies restent au stade R&D et ne sont pas encore déployées commercialement.

Les voies de valorisation considérées imposent une importante consommation énergétique, notamment pour la formation de molécules énergétiques (méthane, carburants), qui s'additionne aux consommations d'énergie liées au captage du CO_2.

Il existe cependant un marché du CO_2 pour des usages directs : 230 Mt de CO_2 sont consommées chaque année dans le monde pour des usages industriels. Les principales utilisations sont la production d'urée et la production d'hydrocarbures (EOR). En France, 0,8 Mt de CO_2 sont consommées chaque année, dont 70 % par l'industrie agroalimentaire (boissons gazeuses, conservation des aliments…), mais également dans les cultures agricoles, la chaîne du froid, le traitement de l'eau ou les procédés industriels.

Si la valorisation du CO_2 permet le remplacement de carbone d'origine fossile par du CO_2 capté, ce qui offrirait idéalement une réduction des émissions d'un facteur 2, ce bilan est grevé par les émissions liées :

- aux procédés et consommations d'énergie dues au captage et à la valorisation du CO_2 ;
- à la réémission, à plus ou moins long terme, du carbone stocké dans le matériau en fin de vie (combustion des carburants, valorisation énergétique des déchets polymères).

L'opportunité de valorisation du CO_2 est donc à évaluer au cas par cas, pour chaque projet.

Les acteurs de la filière française se mobilisent donc pour poursuivre le développement de ces deux voies (CCS et CCU) et les positionner comme des réponses complémentaires aux leviers que sont l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, avec pour objectif de premières mises en œuvre à l'échelle industrielle à l'horizon 2030, en priorité dans des régions industrielles françaises ayant un accès aux capacités de stockage déjà identifiées, notamment sous la mer du Nord.

Pour plus d'informations, voir [14], [15] et [17].

3. Plan de relance et réglementations européennes : une nouvelle dynamique pour la décarbonation de l'industrie

Les éléments précédents ont permis de décrire les enjeux de la décarbonation du secteur industriel et son évolution antérieure, tant en chiffres clés des consommations énergétiques ou émissions de GES qu'en description ou analyse de ses principaux sous-jacents.

En complément, l'état actuel de la mobilisation du secteur industriel peut s'apprécier à l'aune des points suivants :

- pour les industriels énergo-intensifs soumis à la Directive ETS, un durcissement de cette réglementation dans ses modalités d'application (fin des quotas gratuits) et dans son niveau de contraintes (passage de 5 EUR/tCO_2 en 2013 à plus de 55 EUR/tCO_2 en juillet 2021 [18]) est anticipé. On retrouve ainsi l'engouement de certains de ces acteurs pour la mise en place d'un Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières en contrepartie d'une poursuite des quotas gratuits ;

- pour ces même acteurs, pour lesquels l'énergie est un poste de dépenses significatif, même si non soumis à ETS, le débat public autour du prix des énergies suggère une évolution probable de la fiscalité énergie ou carbone, notamment suite à la crise des Gilets jaunes ou à l'exonération des taxes (TICGN, TURPE…) pour les gros consommateurs industriels ;

- pour la majorité de l'industrie, des décisions doivent être prises (ou non) afin d'investir, dès à présent et dans les toutes prochaines années, dans son outil de production, au regard de l'âge du parc industriel. Devra être intégrée la contrainte climatique et énergétique, que ce soit pour les raisons précédentes ou pour répondre aux attentes de la société, notamment dans les dynamiques actuelles autour de la réindustrialisation, qui ont pu être amplifiées avec la crise de la Covid-19 ;

- enfin, pour certains industriels « équipementiers », des opportunités s'ouvrent pour le développement de nouveaux produits ou technologies et donc pour investir de nouveaux marchés liés à la décarbonation de l'industrie.

C'est dans ce contexte que, dès 2019, dans le cadre des travaux du Pacte Productif, se sont structurées les premières initiatives d'envergure sur la décarbonation de l'industrie, avec le lancement de feuilles de route des secteurs industriels énergo-intensifs. Ce travail se poursuit dans le cadre du projet Finance ClimAct[22] porté par l'ADEME. Il est également étendu par les pouvoirs publics vers des secteurs aval moins énergo-intensifs et doit être affiné au niveau des 25 sites industriels les plus émetteurs. Ce volet du Pacte Productif s'est élargi vers des discussions plus globales dans le cadre de l'élaboration de la stratégie d'accélération de la décarbonation de l'industrie, dans le cadre du quatrième programme des investissements d'avenir. On y retrouve ainsi le principe de poursuite du Fonds Décarbonation Industrie, au-delà du Plan de Relance (1,2 milliard d'euros pour 2020-2021-2022) qui a permis son émergence.

Par ailleurs, en Europe, zone de marché principale des industriels français, le tempo politique et ses ambitions en matière de stratégies industrielle et climatique confirme une dynamique renouvelée, en particulier par l'annonce du paquet législatif *Fit for 55 %*. Dans ce cadre, la Commission européenne a présenté une douzaine de textes (renforcement du marché du carbone, introduction d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'UE, révision des directives sur l'efficacité énergétique, la taxation de l'énergie ou sur les renouvelables…), devant permettre à l'Union européenne de réduire ses émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici à 2030.

C'est dans ce contexte que **le monde industriel et ses parties prenantes s'impliquent dans des exercices prospectifs, prenant conscience de l'ampleur des efforts à consentir pour l'ensemble des secteurs, dont le secteur industriel, pour atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'échelle nationale. Les scénarios présentés ci-dessous cherchent donc à éclairer, à travers leurs narratifs tranchés, différentes options envisageables.**

22 Site de Finance ClimAct : https://finance-climact.fr/.

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios

Dans cet exercice, l'industrie est considérée comme un secteur de la demande énergétique, au même titre que le bâtiment ou les transports, en opposition à ceux de l'offre énergétique comme le gaz ou l'électricité. Cependant, c'est un secteur pivot puisque la demande en produits industriels est une conséquence directe des hypothèses des autres secteurs, tant de la demande que de l'offre énergétique. De plus, en tant que producteur et consommateur de déchets, il est aussi très lié à ce secteur.

C'est pourquoi la méthodologie de construction des scénarios a suivi deux grandes étapes : d'une part l'écriture des récits et, d'autre part, la modélisation. Elles ont été menées par itération, pour assurer la cohérence des histoires et des ordres de grandeur, mais aussi la cohérence avec les autres macrosecteurs (transports, bâtiment, etc.).

Différences de périmètre d'analyse sur les activités considérées :

L'industrie recouvre, dans la modélisation qui suit, **l'ensemble des activités répertoriées selon les codes NCE 12 à 38, en accord avec le périmètre utilisé par le CEREN**. Sont donc notamment exclus l'industrie de l'énergie (dont raffinage), le génie civil et le bâtiment. À l'inverse, les vapocraqueurs et les cokeries sidérurgiques y sont inclus. Ce chapitre industrie fait également référence à d'autres sources de données (par exemple *section 1.1* et *2*) : on y retrouve en particulier des données issues du Service des Données et Études Statistiques du ministère de la Transition écologique (SDES[23]) et du CITEPA :

- le CITEPA considère l'industrie au travers du secteur « industrie manufacturière et construction ». Il ne prend notamment pas en compte les émissions liées aux cokeries sidérurgiques mais tient compte d'activités de construction ;
- le périmètre du SDES diffère également de celui du CEREN puisqu'il inclut le secteur de la construction ainsi que les raffineries. Cela induit notamment des écarts conséquents dans la consommation de produits pétroliers. D'autres différences de comptabilité énergétique apparaissent également. Par exemple, le charbon consommé par les hauts fourneaux en sidérurgie est compté en tant que consommation de combustibles dans les bilans CEREN alors qu'il est compté en tant que matière première dans les bilans SDES.

La modélisation du secteur « industrie » dans ce chapitre n'est donc pas effectuée au périmètre du SDES, mais l'est dans le chapitre de consolidation des résultats de l'ensemble de cet exercice de prospective (*cf.* chapitre *3.2. Enseignements, interprétations, limites et perspectives*) afin de pouvoir faire les comparaisons avec les exercices nationaux.

Ces différences de périmètres et de comptabilité imposent une prudence lors de la comparaison des données et résultats entre sources.

4.1. Écriture des récits

Du point de vue du prospectiviste, l'atteinte de **l'objectif de neutralité carbone** suppose, en amont, de se projeter dans des univers extrêmes, y compris pour l'industrie, et d'y positionner les différents acteurs face aux grands choix de société. Les acteurs mobilisés et leur niveau d'implication façonnent alors au premier ordre l'évolution du paysage industriel.

- Une forte implication **citoyenne** pourra modifier les niveaux de production, *via* de fortes baisses de consommation et favoriser le « made in France ». Si ces leviers peuvent stimuler la modernisation des industries, le recul de la demande peut également intensifier l'aversion au risque des industriels et limiter la pénétration de technologies émergentes ou très intensives en CAPEX. Cet univers est décrit dans le **scénario 1**.
- Une forte implication des **collectivités territoriales** pourra favoriser les interconnexions à l'échelle régionale, les boucles d'économie circulaire et une décentralisation des activités industrielles. Cet univers est principalement décrit dans le **scénario 2**.

23 https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/.

- Une forte implication du **gouvernement**, à l'échelle nationale, pourra influencer, *via* des outils incitatifs et règlementaires, une refonte de l'appareil productif, la mise en place d'interconnexions à l'échelle nationale, ainsi que d'éventuelles centralisations des activités sur le territoire. Cet univers est décrit dans les **scénarios 2 et 3**.

- Une forte implication des **institutions européennes** pourra soutenir des interconnexions à l'échelle européenne, pousser à la spécialisation de l'appareil productif selon les pays de l'Union, densifier les échanges commerciaux intra-européens ou favoriser le « made in Europe ». Cet univers est décrit dans le **scénario 3**.

- Une forte implication des **industriels** pourra favoriser une décarbonation organisée à l'échelle internationale, mais restera limitée par les règles de fonctionnement de la compétition économique. Une implication unilatérale des industriels n'est décrite que dans le scénario 4, dans lequel les industriels se mobilisent sur les technologies CCS. Une implication forte des industriels est cependant considérée dans les scénarios 2 et 3, dans lesquels ils bénéficient de l'appui des pouvoirs publics.

Ces choix de société se déclinent concrètement autour de trois problématiques : la demande industrielle, le lieu de production et l'outil de production.

DEMANDE INTÉRIEURE : QUELS MODES DE CONSOMMATION ?

Les quantités et qualités de chaque produit consommé sont autant de choix de société qui redessinent le paysage industriel. L'évolution des besoins, qui se décline dans d'autres secteurs, tels que les transports (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*) ou le bâtiment (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*), définit les productions industrielles à ralentir, transformer ou renforcer. Outre les volumes à produire, les exigences quant à la forme ou la qualité des produits pourront notamment moduler la place à attribuer à l'écoconception ou à l'incorporation d'intrants alternatifs. De nouveaux produits ou usages devraient également émerger.

(RÉ)INDUSTRIALISATION : QUELLE PRODUCTION NATIONALE ET QUELLES IMPLANTATIONS TERRITORIALES ?

Les niveaux de production des industries françaises dépendent de la demande intérieure, mais aussi des niveaux d'importation et d'exportation en jeu dans le cadre du commerce international. Différentes politiques industrielles peuvent donc être envisagées : protectionnisme, relocalisations (*cf.* *section 5*, encadré *Au-delà du solde commercial, une nécessité de clarifier relocalisation et réindustrialisation selon les scénarios*), spécialisations de l'industrie française dans certaines filières, préférence pour les échanges intra-européens, intensification de la circulation des biens à l'échelle mondiale… Ces choix de politique industrielle et commerciale ont un impact direct sur le niveau d'effort à fournir pour décarboner l'appareil productif français. En particulier, la conservation des industries lourdes sur le territoire peut nécessiter la mise en place de technologies de captage et stockage géologique du CO_2 afin d'absorber les émissions résiduelles associées.

DÉCARBONATION DE L'APPAREIL PRODUCTIF : QUELS MODES DE PRODUCTION ?

De nombreuses technologies peuvent être mises en place afin de répondre aux besoins de production tout en minimisant les impacts environnementaux. Cependant, les choix technologiques effectués seront principalement fonction des freins rencontrés et des leviers mobilisables (*cf.* *section 1.3*) dans le contexte de chaque scénario. Des univers contrastés se dessinent ainsi selon la capacité d'investissement des industriels, le contexte règlementaire, le prix du carbone et des énergies, ou selon les interférences entre acteurs autour des vecteurs énergétiques et des chaînes d'approvisionnement[24].

Aussi, pour modéliser ces scénarios, il a été nécessaire d'effectuer un important travail de mise en cohérence avec les autres macrosecteurs (bâtiment, transports…) qui s'est structuré autour de deux grands éléments :

- la philosophie générale donnée à tous les macrosecteurs a permis de définir des grands principes de cadrage de certaines hypothèses, comme le recours accru à la biomasse dans S1 et S2 contre l'électrification dans S3 et S4 ;

24 C'est par exemple le cas pour la production de plastiques, basée à l'heure actuelle sur la coproduction de naphta dans les raffineries. Dans l'hypothèse d'un abandon des énergies fossiles, la pétrochimie aurait à se réinventer en l'absence de raffineries : importations, production de méthanol à partir d'hydrogène – selon les infrastructures et capacités électriques disponibles, vapocraquage de déchets pyrolysés – selon les flux de matières premières de recyclage, production de bionaphtas ou bioéthanols – selon les disponibilités en biomasse, etc.

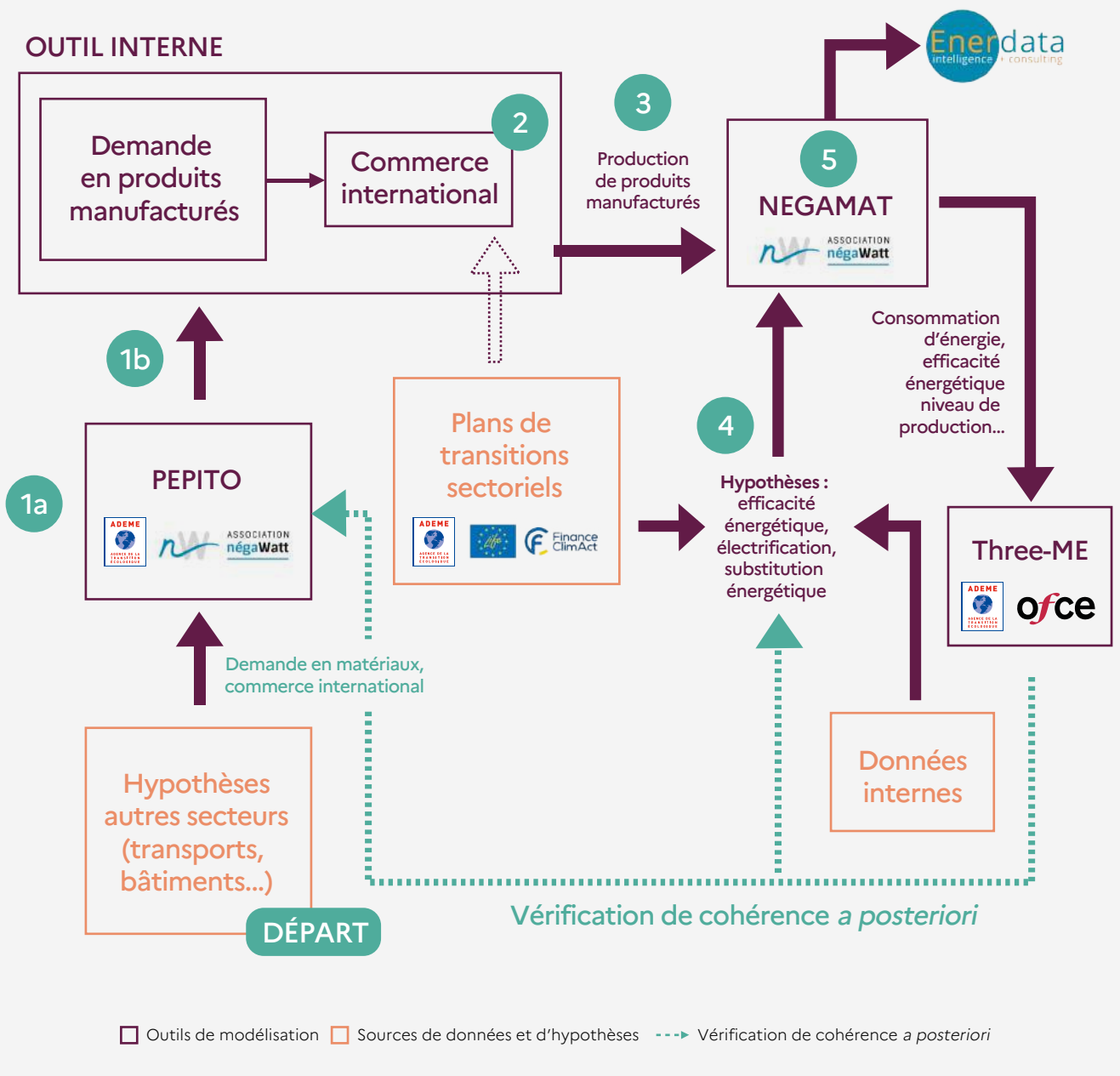
- ceux-ci ont cependant été challengés au regard des niveaux de demande en produits industriels, induits par les autres macrosecteurs. Ils conditionnent en effet considérablement les stratégies industrielles à mettre en place. Ainsi, un investissement massif semble difficilement justifiable si les perspectives de production industrielle sont envisagées drastiquement à la baisse.

L'objectif de l'exercice étant de présenter une diversité d'univers permettant d'alimenter le débat autour des différentes trajectoires potentielles de décarbonation, un maximum de contrastes a été recherché pour en tirer le plus d'enseignements possibles.

4.2. Méthodologie de modélisation des consommations d'énergie

La chaîne de modélisation utilisée est présentée sur la *Figure 3*. Globalement, l'approche retenue est centrée sur les volumes de production physique.

Figure 3 *Méthodologie de modélisation du secteur industriel*



Calibrage de la méthodologie de scénarisation : le scénario tendanciel

Les niveaux de production industrielle du scénario tendanciel ont été déterminés selon la même méthodologie que les autres scénarios. Les hypothèses énergétiques ont été établies par analogie au scénario AME 2021 de la DGEC. Les niveaux de production étant différents entre les deux exercices, des simulations à iso-production ont été réalisées afin de retranscrire au mieux des hypothèses d'efficacité énergétique et de mix énergétique compatibles entre ces deux approches. Cependant, certaines ont été adaptées pour répondre à un niveau de finesse plus important, notamment afin de :

- correspondre au paramétrage du modèle négaMat (efficacité énergétique combustible/électrique, mix énergétiques détaillés par usage…) ;
- se rapprocher du mix énergétique final du scénario AME 2021 ;
- rester cohérent avec les potentiels maximums d'efficacité énergétique sous-sectoriels utilisés dans les autres scénarios (*cf. section 5*) ;
- correspondre aux travaux réalisés dans le cadre des premiers Plans de Transition Sectoriels ;
- garantir certaines contraintes techniques au sein des mix négaMat plus précis (biomasse difficilement compatible avec les procédés haute température, combustibles utilisés également en tant que réactifs maintenus…).

4.2.1. Définition de la demande, du commerce international et de la production de produits industriels

1a

La demande en matériaux issus des IGCE est déterminée à partir de l'outil **PEPITO** [19] sur la base de plus de 200 paramètres, traduisant les hypothèses des autres macrosecteurs (transports, bâtiment, agriculture et alimentation, biens de consommation…), tels que décrits dans ce document.

1b

Pour certains secteurs non IGCE, la demande est indexée sur celle des IGCE au sein d'un outil interne. À titre d'exemple, l'évolution de la demande en ferroalliages correspond à la demande modélisée pour l'industrie sidérurgique.

En tout, **70 sous-secteurs sont modélisés.**

2

La prise en compte du commerce international dans la méthodologie de modélisation s'illustre par la définition d'un indicateur, le taux S/P (solde commercial en volume physique ramené à la production), variant selon les secteurs industriels, tel que :

$$\frac{S}{P} = \frac{\text{solde commercial}}{\text{production}} = \frac{\text{exportations-importations}}{\text{production}}$$

Dans un secteur importateur net, le solde commercial, et donc le taux S/P sont négatifs. Néanmoins, le taux S/P évolue selon les scénarios (*cf. section 5*, encadré *Commerce international*), pouvant :

- augmenter dans S1 et S2 dans lesquels une relocalisation d'activité est envisagée ;
- rester stable dans S3 dans lequel la dynamique des échanges commerciaux est conservée ;
- diminuer dans S4 dans lequel les avantages comparatifs des pays se renforcent.

Le raisonnement est identique si le secteur est exportateur net : le taux S/P est alors positif. Dans S1 et S2, ce taux pourra diminuer si des relocalisations d'activité sont également envisagées dans les pays tiers, pesant sur les exportations françaises.

En revanche, le taux S/P ne capte pas l'intensité des échanges : une valeur de 0 % indique seulement que les exportations et les importations se compensent et non l'absence d'échanges.

3

À ce stade, la production industrielle sur le territoire français, à destination de la consommation française et de l'export, est définie pour chaque scénario et chacun des 70 sous-secteurs. Cette définition tient compte d'évolutions de la répartition entre filières de production alternatives notamment à base de matières premières vierges ou recyclées (*cf. section 4.3. Empreinte matière*).

Cette production industrielle est ensuite intégrée dans l'outil de modélisation Excel **négaMat**, développé par l'Association négaWatt afin d'évaluer les niveaux de consommations énergétiques de 70 sous-secteurs industriels à partir de scénarios d'évolution de leurs niveaux de production.

4.2.2. Efficacité énergétique, électrification et mix énergétique

4

Des potentiels maximums d'**efficacité énergétique** sectoriels et transversaux à 2050 ont été déterminés à partir de données du CEREN et de coefficients de faisabilité technico-économiques. Ils incluent notamment des actions de **récupération de chaleur fatale** avec valorisation sur le site. De même, un potentiel maximum d'**électrification** sectoriel a été déterminé à partir d'études du CEREN [13] et d'ALLICE [20].

Ces potentiels maximums ont été modulés en fonction des scénarios selon plusieurs critères : le soutien financier de l'État, le niveau de production, les demandes du consommateur, le contexte règlementaire, la recherche de réduction des coûts liés à l'énergie pour des raisons de santé économique et de compétitivité, les développements technologiques, etc.

Les coefficients de faisabilité technico-économiques associés aux actions d'économies d'énergie étudiées n'ont pas été différenciés selon les scénarios. Certains potentiels maximums d'efficacité énergétique pourraient donc être revus à la hausse ou à la baisse.

Des hypothèses de **mix énergétiques** thermiques des process, des chaudières et des cogénérations ont été formulées, prenant en compte les vecteurs énergétiques suivants :

- vapeur ;
- charbon ;
- réseau de gaz ;
- GPL ;
- autres produits pétroliers ;
- biomasse ;
- combustibles spéciaux non renouvelables[25] ;
- hydrogène ;
- solaire thermique.

Certaines contraintes techniques ont été prises en compte dans le mix énergétique des process. Ceux fonctionnant à hautes températures ont été alimentés par du gaz naturel plutôt que par de la biomasse, du fait de difficultés techniques reconnues pour atteindre les températures requises.

Il a également été considéré l'utilisation de combustibles solides de récupération (CSR), en particulier dans les cimenteries (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*).

Les combustibles, comme les produits pétroliers et le charbon par exemple, qui jouent parfois aussi le rôle de réactifs chimiques, ont été conservés dans certains secteurs.

Par ailleurs, les cogénérations ont fait l'objet d'hypothèses simplificatrices. Celles alimentées par de la biomasse en fonctionnement en 2014 ont été conservées. Celles lauréates des appels de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) entre 2014 et 2021 et programmées dans le futur ont été ajoutées. Les autres ont été converties au gaz naturel.

Le nombre important d'hypothèses n'a pas rendu possible l'étude précise du mix énergétique thermique de chaque sous-secteur.

La récupération de chaleur fatale avec valorisation interne n'a pas été traitée comme un vecteur énergétique mais a été directement intégrée aux potentiels sectoriels d'économies d'énergie explicités plus haut. La récupération de chaleur avec valorisation externe a été incluse dans les réseaux de chaleur.

25 Les combustibles spéciaux non renouvelables correspondent à des déchets industriels non renouvelables (pneus usagés, peintures, solvants, etc.) et à des combustibles solides de récupération (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*).

4.3. Empreinte matière

Par ailleurs, la prise en compte des leviers d'efficacité matière a été modélisée en considérant :

- des filières de production alternatives à partir de matières premières recyclées (verre, acier, aluminium, plastiques, papier) ;
- des intrants matières alternatifs (argiles calcinées en substitution au clinker dans les cimenteries, bio-naphta en substitution au naphta dans les vapo-craqueurs, anode inerte en substitution aux anodes carbone dans l'aluminium…) qui réduisent les émissions « process » non énergétiques ;
- des usages optimisés des matériaux industriels selon leur teneur bas carbone qui permettent d'orienter la production industrielle bas carbone des IGCE (ex. : diminution de la quantité de ciment dans un ouvrage…).

Ces leviers de décarbonation sont modélisés au sein de l'outil PEPIT0, soit par la modification des taux d'incorporation de matières premières vierges/matières premières recyclées, soit par une baisse de la demande (ex. : taux de clinker différenciés selon les scénarios en fonction de la pénétration des argiles calcinées en substitution au clinker dans les cimenteries), soit directement par les hypothèses transmises par les autres secteurs de la demande (ex. : procédés constructifs différents pour le secteur du bâtiment).

4.4. Des consommations énergétiques aux émissions de GES

La modélisation des consommations énergétiques exposée précédemment peut ensuite être convertie en émissions énergétiques de gaz à effet de serre, par multiplication avec les facteurs d'émissions des différentes énergies utilisées.

Les autres leviers de décarbonation, liés à l'efficacité matière et à la réduction des émissions non énergétiques, sont :

- soit indirectement pris en compte dans les niveaux de demande en produits industriels (ex. : diminution de la demande en clinker liée à son remplacement par des argiles calcinées ou autres intrants alternatifs)[26] ;
- soit pris en compte explicitement, en ce qui concerne les réductions d'émissions permises par l'utilisation d'anodes inertes dans la production d'aluminium ;
- soit déterminés sur la base de l'inventaire 2014 du CITEPA [21], par indexation à la production industrielle des secteurs concernés ;
- soit, pour les PFC, SF_6 et NF_3, déterminés par des tendances d'évolution par scénario fournies par le CITEPA ;
- soit, pour les HFC, déterminés par le CITEPA.

4.5. Des modélisations sectorielles complexes

En complément de ces approches méthodologiques, certains secteurs ont bénéficié d'une modélisation plus poussée pour tenir compte des interactions complexes entre différents sous-produits. C'est particulièrement le cas dans la pétrochimie qui croise des problématiques liées à l'utilisation des matières fossiles, au recyclage des plastiques, etc. (*cf. section 5.6*, encadré *Focus sur la chimie des plastiques*).

26 Ces complexités méthodologiques sont en cours d'études, notamment au travers des Plans de Transition Sectoriels des IGCE. www.finance-climact.fr.

5. Stratégies pour le secteur selon chaque scénario

L'ensemble des scénarios s'articule autour de neuf leviers et métriques de transformations, activés avec plus ou moins d'intensité selon l'univers prospectiviste décrit.

ACTIVITÉ INDUSTRIELLE

1. Le **niveau de demande** industrielle domestique retranscrit les modes de consommation des citoyens, découlant des mutations engagées dans l'ensemble des secteurs de l'économie, en particulier dans les secteurs des transports, des bâtiments, des engrais et des emballages. La *Figure 4* présente la ventilation de la demande des secteurs consommateurs en matériaux issus des IGCE, en millions de tonnes.

2. Le **commerce international**, matérialisé par le taux S/P, représente la part de la demande qui sera assurée par l'appareil productif national (*cf.* encadré *Commerce international*).

3. Le **niveau de production** qui en découle définit le nombre, la capacité et la localisation des sites industriels actifs pour chaque catégorie de produit considéré.

TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION

4. L'**efficacité énergétique** quantifie les efforts des industries sur la réduction de leurs consommations d'énergie, modulés selon les niveaux d'investissements accessibles et les éventuelles aides publiques.

5. L'**efficacité matière** représente les niveaux d'incorporation d'intrants alternatifs, notamment les matières premières de recyclage.

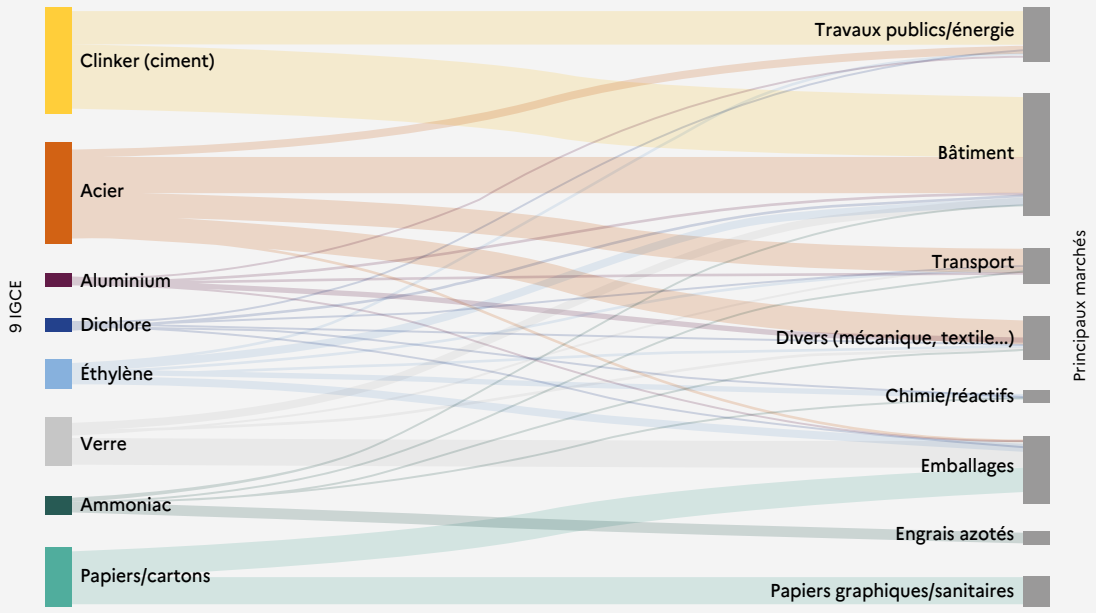
6. L'**évolution du mix énergétique** traduit les évolutions des industries pour accueillir des sources d'énergies décarbonées.

7. L'**usage d'hydrogène** traduit la pénétration de ce vecteur singulier pour les différents usages dans l'industrie, en interaction avec les chaînes d'approvisionnement et le système énergétique.

8. Le **captage et le stockage géologique du CO_2** représentent une solution de réduction des émissions industrielles[27].

9. Le **captage et la valorisation du CO_2** offrent des débouchés afin d'utiliser le CO_2 capté dans des filières potentiellement décarbonées.

Figure 4 Principaux flux de matériaux en provenance de l'industrie lourde (IGCE) en 2014



27 Le captage et stockage de CO_2 (CCS) dans l'industrie est comptabilisé, dans ce chapitre, en incluant les parts de CO_2 capté d'origine biogénique (BECCS). En revanche, les chiffres présentés n'incluent pas les émissions captées sur les unités de valorisation énergétique des déchets (UIOM).

Ces leviers sont décrits, pour chaque scénario, dans le *Tableau 2* de synthèse ci-dessous.

Tableau 2 Degré de développement des neuf leviers de transformation de l'industrie dans les scénarios

		TEND	S1	S2	S3	S4
Recul de la demande			Baisse drastique de la demande	Baisse drastique de la demande	Baisse modérée de la demande	Demande stable
Amélioration du solde commercial			Baisse des importations en raison du « made in France » impulsé par les consommateurs	Réindustrialisations et exportations soutenues par les pouvoirs publics	Tendance aux échanges maintenue dans un cadre européen	Intensification des tendances de mondialisation
Recul de la production			Chute drastique de la production industrielle, malgré les limitations d'importations	Chute de la production industrielle due aux baisses de la demande, en partie compensées par la dynamique de réindustrialisation	Réduction importante de la production industrielle accentuée par un *statu quo* dans le commerce international	Accentuation de la baisse de la production malgré une demande stable, en raison de l'intensification des importations
Efficacité énergétique			Effort notable pour conserver des parts de marché (image verte)	Effort très important (parts de marché, soutien de l'État)	Effort notable pour conserver les parts de marché (compétitivité internationale, électrification)	Effort tendanciel
Efficacité matière			Augmentation du taux de MPR	Augmentation forte du taux de MPR	Augmentation du taux de MPR	Taux de MPR tendanciel
Mix énergétique	Biomasse		Très forte pénétration de la biomasse	Forte pénétration de la biomasse	Développement tendanciel de la biomasse	Développement tendanciel de la biomasse
	Électricité		Électrification tendancielle	Électrification tendancielle	Électrification des chaudières et des procédés	Électrification des chaudières et des procédés
Hydrogène (dans l'industrie)						
CCS						
CCU						

Faible développement — Fort développement

Commerce international : des échanges de biens dont il est nécessaire de mesurer davantage la portée pour un monde neutre en carbone

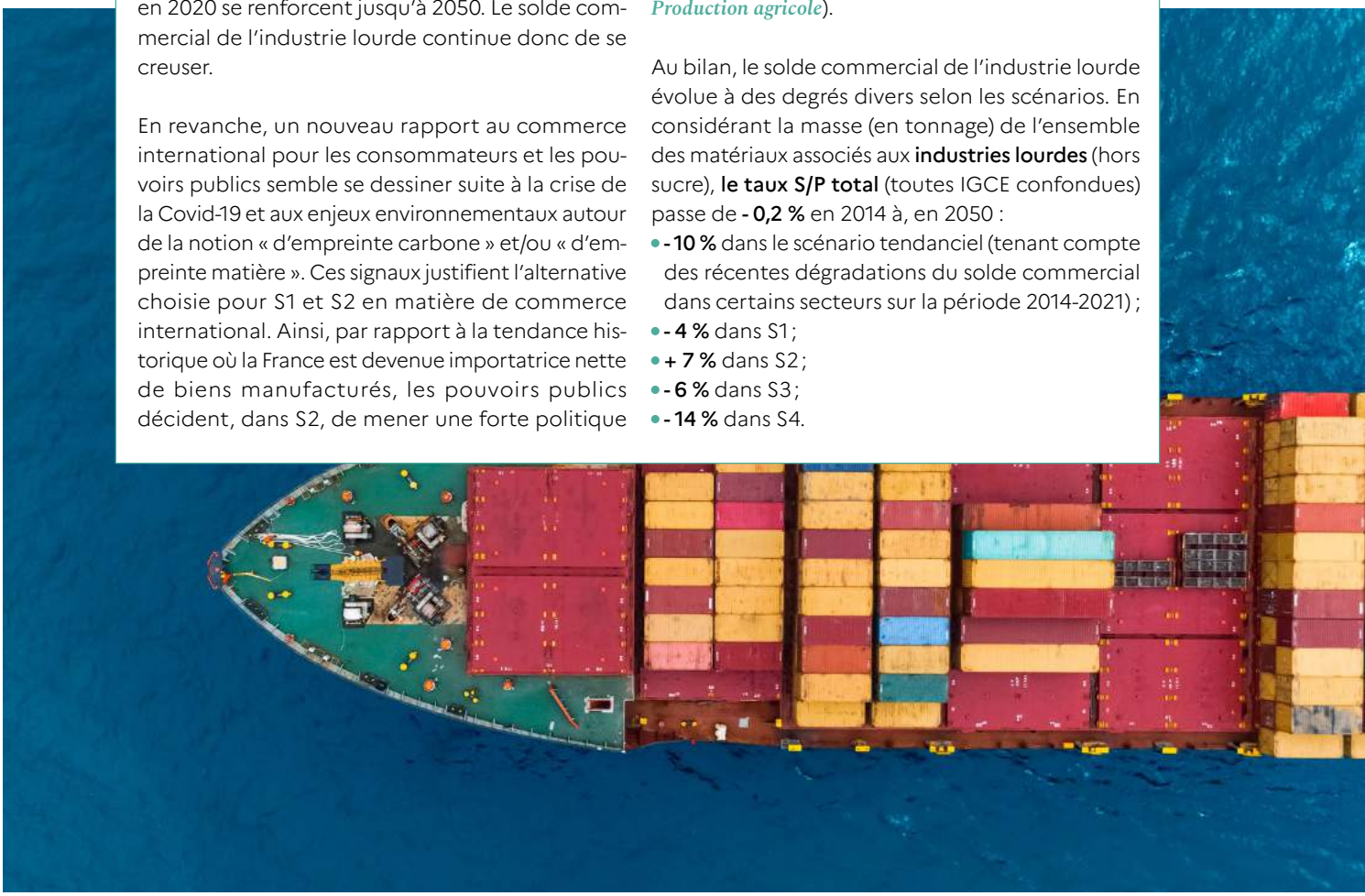
La hausse continue des importations et des exportations de biens manufacturés en France entre 1995 et 2015 (respectivement + 243 % et + 224 %) illustre l'étirement géographique des chaînes de valeur sous l'effet de la baisse du coût du transport et de l'émergence de pays dont l'avantage comparatif sur le coût du travail a permis l'offre de nouveaux produits à bas prix dans les pays industrialisés. Cette tendance historique est également le reflet de l'absence d'internalisation d'un prix du CO_2 dans le coût de production et de la non-prise en compte de critères environnementaux dans les choix de consommation. Sous l'hypothèse que l'ensemble des partenaires commerciaux de la France décarbonent leur économie dans les mêmes conditions, le taux S/P (solde commercial en volume physique ramené à la production, *cf. section 4*) dans S3 se maintient quasiment à son niveau de 2020. Si une partie de l'acier produit à partir d'hydrogène est en effet davantage exportée, la France se maintient globalement comme un importateur net. Les consommateurs sont sensibles au « made in Europe » mais pas nécessairement au « made in France ». Dans S4, les flux de marchandises et de personnes sont facilités avec la décarbonation du secteur des transports et les avantages comparatifs en vigueur en 2020 se renforcent jusqu'à 2050. Le solde commercial de l'industrie lourde continue donc de se creuser.

En revanche, un nouveau rapport au commerce international pour les consommateurs et les pouvoirs publics semble se dessiner suite à la crise de la Covid-19 et aux enjeux environnementaux autour de la notion « d'empreinte carbone » et/ou « d'empreinte matière ». Ces signaux justifient l'alternative choisie pour S1 et S2 en matière de commerce international. Ainsi, par rapport à la tendance historique où la France est devenue importatrice nette de biens manufacturés, les pouvoirs publics décident, dans S2, de mener une forte politique de relocalisation dans des secteurs stratégiques (en particulier filières métaux et plastiques) permettant aussi de dégager des exportations significatives ciblées. Combinaisons de mesures de soutien à ces secteurs et de négociations européennes, ces évolutions traduisent une volonté de rayonnement de la France à l'international autour de produits et technologies décarbonés. Dans S1, la forte prise de conscience des consommateurs a également un effet significatif sur le solde commercial. Le « made in France » s'est diffusé sur tous les échelons de la société et l'appétence des consommateurs pour des produits ayant parcouru des milliers de kilomètres est fortement réduite. Une part incompressible d'importations se maintient néanmoins afin d'assurer un approvisionnement en matières premières vierges et de recyclage.

Par ailleurs, l'évolution des industries agroalimentaires est directement liée aux enjeux climatiques de la production agricole (usage des sols, biocarburants) et à l'évolution des régimes alimentaires. Par conséquent, les évolutions de solde associées à ces industries tiennent compte de ces arbitrages au premier ordre et peuvent différer de la logique d'évolution des autres industries (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*).

Au bilan, le solde commercial de l'industrie lourde évolue à des degrés divers selon les scénarios. En considérant la masse (en tonnage) de l'ensemble des matériaux associés aux **industries lourdes** (hors sucre), **le taux S/P total** (toutes IGCE confondues) passe de **- 0,2 %** en 2014 à, en 2050 :

- **- 10 %** dans le scénario tendanciel (tenant compte des récentes dégradations du solde commercial dans certains secteurs sur la période 2014-2021) ;
- **- 4 %** dans S1 ;
- **+ 7 %** dans S2 ;
- **- 6 %** dans S3 ;
- **- 14 %** dans S4.



Au-delà du solde commercial, une nécessité de clarifier relocalisation et réindustrialisation selon les scénarios

Les conséquences économiques de la crise de la Covid-19 ont mis en lumière l'étirement des chaînes de valeur et la vulnérabilité de certains secteurs devant les difficultés d'approvisionnement pour certaines matières premières et/ou produits semi-finis. Un tel contexte de transition permet ainsi d'envisager des relocalisations d'activité dans S1 et S2.

Concept émergent depuis quelques années, le terme de *relocalisation* s'oppose à celui de *délocalisation* et vise à rapatrier en France de l'activité antérieurement localisée à l'étranger. En revanche, il est complexe d'anticiper la façon dont ces potentielles relocalisations se traduiront à l'échelle des sites industriels (réouvertures de sites, augmentation des capacités existantes…).

La *réindustrialisation*, par opposition à *désindustrialisation*, s'entend, dans notre approche, comme une notion macroéconomique où la part de l'industrie dans le PIB serait plus importante et où l'emploi industriel serait relativement amené à croître. Les hypothèses prises en compte dans chacun des scénarios concernant l'évolution de la demande intérieure rendent la réindustrialisation des secteurs IGCE difficilement envisageable dans S1, S3 et S4 mais possible sur certaines filières ciblées dans S2. Néanmoins, hors IGCE, certains secteurs industriels comme ceux liés aux énergies renouvelables, à la production d'hydrogène ou les nouvelles activités de l'économie circulaire pourraient bénéficier de la transition selon les scénarios. La prise en compte des enjeux d'adaptation des territoires et de formation semble ainsi nécessaire pour optimiser le déploiement de ces activités industrielles.

- Dans S1, la prise de conscience des consommateurs aboutit à de nouveaux arbitrages en faveur des produits « made in France ». Cependant, dans plus de 80 % des secteurs ainsi « relocalisés », cette dynamique limite l'érosion de l'activité industrielle due à la chute de la demande intérieure mais n'implique pas des hausses de production. Dans ce scénario, la relocalisation dans une France neutre en carbone est envisagée comme un moyen de limiter la baisse du taux d'utilisation des capacités de production dans l'industrie et ainsi de maintenir des sites existants.

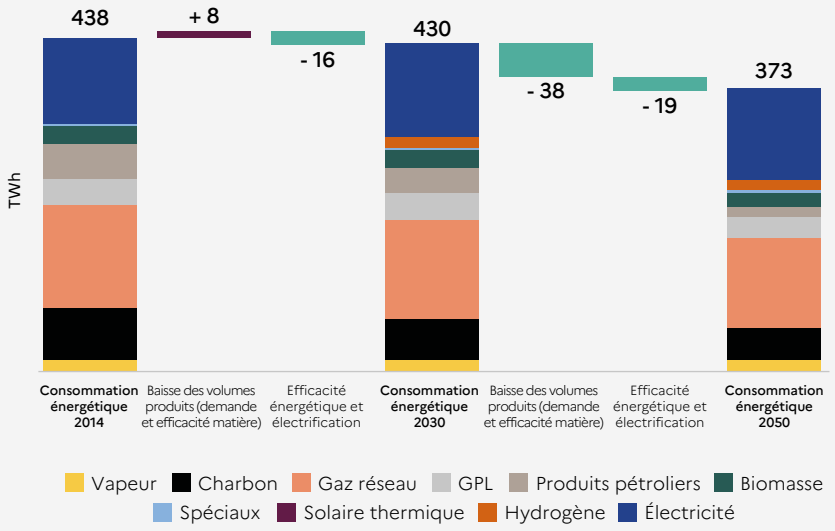
- Dans S2, les pouvoirs publics se saisissent de la problématique de l'étirement des chaînes de valeur sur certains secteurs. Cette relocalisation y prend la forme d'une réindustrialisation et est donc plus ambitieuse, tant en nombre de secteurs concernés qu'en dynamisation de la production : près d'un tiers des secteurs améliorant leur solde commercial voient leur production augmenter, notamment sur les secteurs innovants liés à l'économie circulaire.

Ces constats « en volume physique » peuvent être nuancés dans le cas où la production industrielle évoluerait vers un modèle plus « qualitatif » dans lequel les biens vendus sont certes moins nombreux mais plus durables, intégrant donc une valeur ajoutée plus importante (ex. : textile « made in France »). Sous cette approche « en valeur », certains secteurs pourraient dès lors voir leur valeur ajoutée augmenter sans nécessairement véhiculer une dimension de réindustrialisation en matière de production et d'emplois associés.

- Dans S3 et S4, la relocalisation n'est pas envisagée dans la mesure où les avantages comparatifs existants sont maintenus (S3) et accentués (S4).

5.1. Scénario tendanciel : une poursuite des dynamiques actuelles de consommation et de désindustrialisation

Graphique 5 Décomposition par levier des baisses de consommation énergétique dans le scénario tendanciel, entre 2014 et 2050[28 29]



Ce scénario considère une **poursuite des tendances engagées** *(Graphique 5)*. Il est structuré, en particulier, par les évolutions tendancielles des secteurs de la demande industrielle (bâtiment et transports notamment), constituant un prolongement des niveaux et modes de consommation. Les dispositifs de soutien public existants et les mesures prenant effet sur la période de l'exercice, telles que la réglementation RE2020 ou l'interdiction de l'utilisation des plastiques à usage unique, y sont pris en compte afin de soutenir les évolutions de la demande ainsi que la modernisation des sites industriels. Les échanges commerciaux poursuivent la tendance en cours de mondialisation et de désindustrialisation.

> PRODUCTION : UN RECUL SENSIBLE DE LA DEMANDE DANS L'INDUSTRIE LOURDE ABAISSE LES NIVEAUX DE PRODUCTION DÉJÀ AFFECTÉS PAR LA DÉSINDUSTRIALISATION

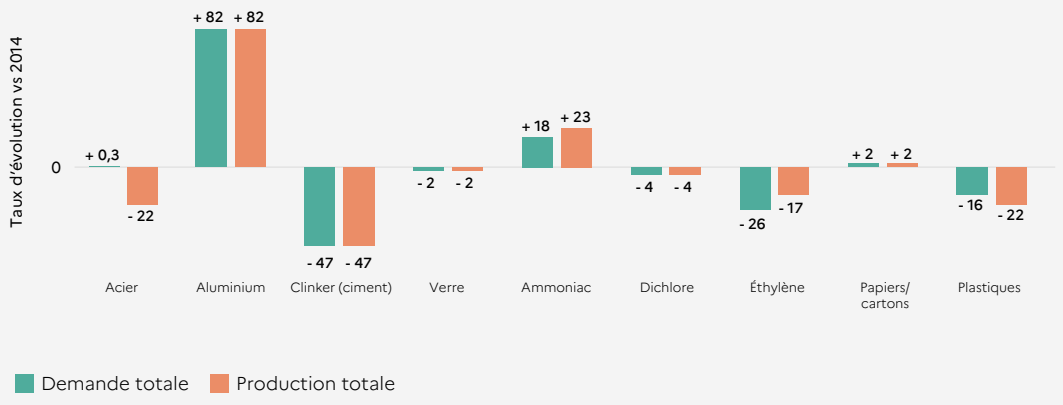
- **Demande**. Les réglementations prenant effet sur la période et les évolutions démographiques induisent une réduction significative de la demande industrielle pour les secteurs des emballages et de la construction. Ces effets masquent cependant le maintien de tendances haussières dans la consommation de certains produits industriels, notamment dans l'industrie aval. Dans l'industrie lourde, le secteur de l'aluminium voit sa demande en provenance des transports plus que tripler. En outre, la demande en ammoniac (plastiques thermodurcissables et polyuréthane) progresse de 18 % par rapport à 2014 sous l'effet notamment de la dynamisation du secteur des transports (augmentation de 29 % de la vente de véhicules particuliers neufs) et des hausses de consommation de biens d'équipements.

- **Commerce international**. Les échanges commerciaux s'intensifient à l'échelle mondiale avec un recentrage régional en Europe suggéré par les discussions en cours, notamment autour du mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'UE. Pour les matériaux (hors sucre) issus des industries lourdes (IGCE), le solde commercial de la France devient davantage importateur, à hauteur de 10 % du volume physique de production. Certaines tendances observées après 2014, telles que le passage à un solde importateur pour les aciers longs, se prolongent jusqu'en 2050.

28 Les baisses de volumes produits sont liées aux réductions de la demande et aux efforts d'efficacité matière.
29 Les consommations d'hydrogène ne sont pas représentées en 2014 : une part des consommations de gaz réseau est mobilisée pour leur production. En 2019, les consommations d'hydrogène de l'industrie (hors raffinage) représentent près de 10 TWh, dont trois quarts sont dédiées à la production d'engrais et un quart à la production de méthanol.

- **Évolution de la production en volume, en produits, en localisation**. La production industrielle poursuit son recul dans la plupart des secteurs, à l'exception des secteurs de l'aluminium, de l'automobile, du bois et de la fonderie *(Graphique 6)*. Le dynamisme de la filière aluminium permet l'ouverture d'un site de production primaire.

Graphique 6 Évolution (en %) des volumes totaux de demande et de production des industries lourdes (IGCE) en 2050 dans le scénario tendanciel par rapport à 2014[30]



TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION : UNE DÉCARBONATION DU MIX ÉNERGÉTIQUE SOUTENUE PAR L'ÉTAT ET DES EFFORTS PARTIELS D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ENCOURAGÉS PAR LES PROBLÉMATIQUES DE COMPÉTITIVITÉ

Les pouvoirs publics poursuivent leur soutien à la modernisation des sites industriels par le biais d'aides similaires aux dispositifs existants (ex. : Fonds de Décarbonation de l'Industrie, CEE, BCIAT).

- **Efficacité matière**. Les efforts en efficacité matière restent constants par rapport à 2014. Au total, les secteurs de l'acier, de l'aluminium, du verre, du papier-carton et du plastique incorporent des matières premières de recyclage à hauteur de 45 % de leurs tonnages cumulés.

- **Efficacité énergétique**. Les efforts en efficacité énergétique suivent les tendances prévues dans le scénario AME de la SNBC, prenant en compte les mesures mises en place à l'heure actuelle. Ces niveaux d'efficacité énergétique ont cependant été modulés afin de correspondre à la méthodologie utilisée dans les autres scénarios (*cf. section 4*).

- **Mix énergétique**. L'évolution du mix énergétique reprend les tendances prévues dans le scénario AME de la SNBC, prenant en compte les mesures mises en place à l'heure actuelle. Ces évolutions ont cependant été modulées, notamment afin de limiter l'usage de produits fossiles sans remettre en cause certains usages non énergétiques (*cf. section 4*).

- **Usage d'hydrogène**. L'utilisation d'hydrogène dans l'industrie (production de méthanol et d'engrais) atteint 13 TWh en 2050 et s'effectue par reformage de gaz du réseau.

- **Captage et stockage géologique du CO_2**. Un développement minimal des technologies CCS (7,4 Mt de CO_2 captées par an dans l'industrie en 2050), et essentiellement ciblé sur l'industrie lourde[31], est considéré dans ce scénario. En effet, la poursuite de la hausse du prix du carbone à l'échelle européenne et les subventions de l'UE ainsi que de la France favorisent la mise en place de hubs CO_2[32] sur les grands sites industriels (tels que ceux de Dunkerque ou du Havre) à destination de la mer du Nord.

- **Captage et valorisation du CO_2**. La valorisation du CO_2 est mobilisée pour la production de méthanol dans l'industrie chimique à hauteur de 750 ktCO_2 par an en 2050. Le méthanol est en effet une brique élémentaire de la chimie organique en fort développement actuellement, notamment en Asie. Le captage de CO_2 valorisé est essentiellement d'origine biogénique (unités de méthanisation, bioraffineries), afin de décarboner les produits obtenus.

30 La catégorie « vapocraquage » se réfère à la production des oléfines constitutives des plastiques (éthylène, propylène, benzène, etc.) par vapocraquage.
31 En particulier : cimenteries, sidérurgies et sources concentrées de CO_2 (production d'ammoniac et vaporeformage de méthane).
32 Infrastructures de transport et de liquéfaction et stockage portuaires de CO_2.

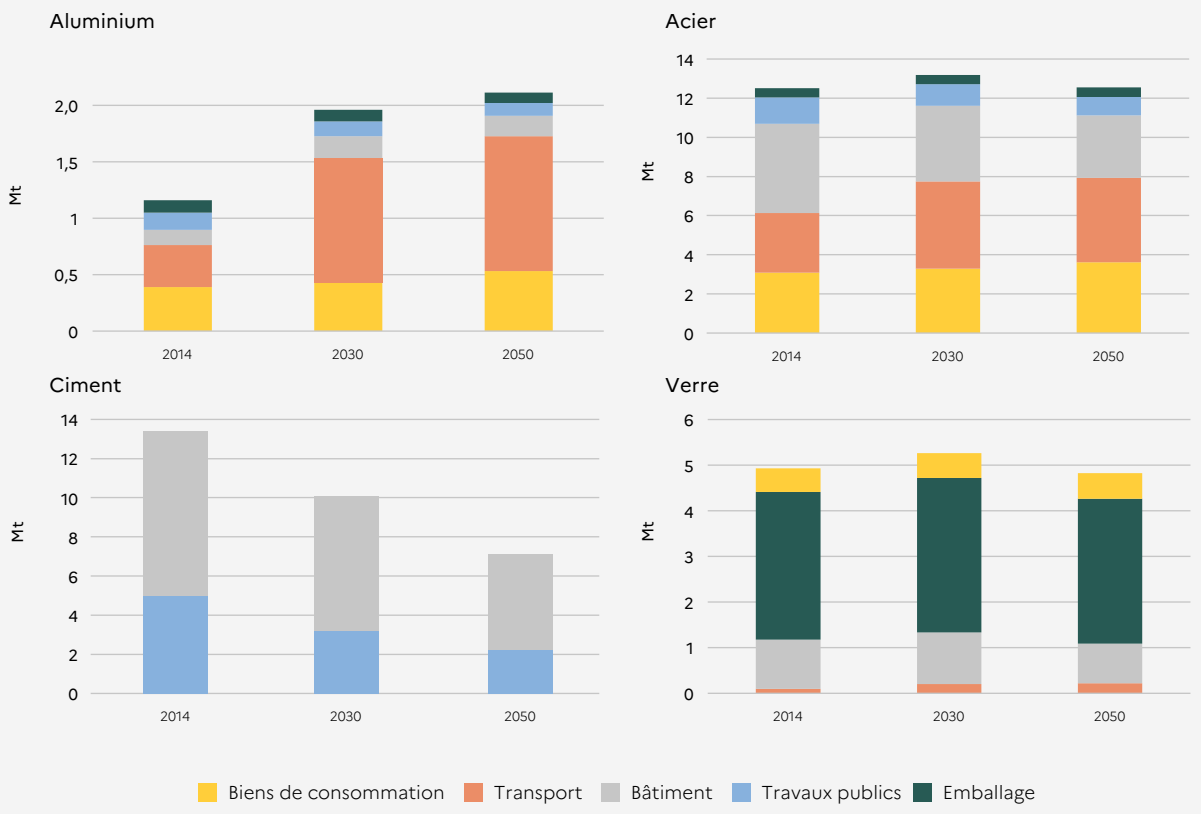
Trajectoires : illustration de points de passage en 2030

Les évolutions de la production industrielle *(Graphique 7)* sont fortement liées aux évolutions de la demande des secteurs des transports (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), du bâtiment (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) et des emballages (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*). En particulier :

- **la demande en aluminium** suit notamment la production de véhicules et croît fortement (+ 69 %) entre 2014 et 2030, puis à un rythme plus faible (+ 8 %) entre 2030 et 2050 ;
- **la demande en ciment** suit notamment l'évolution des constructions neuves et se réduit dès l'horizon 2030 (- 25 % entre 2014 et 2030) selon une trajectoire qui se poursuit jusqu'en 2050 (- 30 % entre 2030 et 2050) ;
- **la demande en verre** progresse de 7 % entre 2014 et 2030 mais se réduit ensuite (- 8 % entre 2030 et 2050) avec le développement de la réutilisation des emballages.

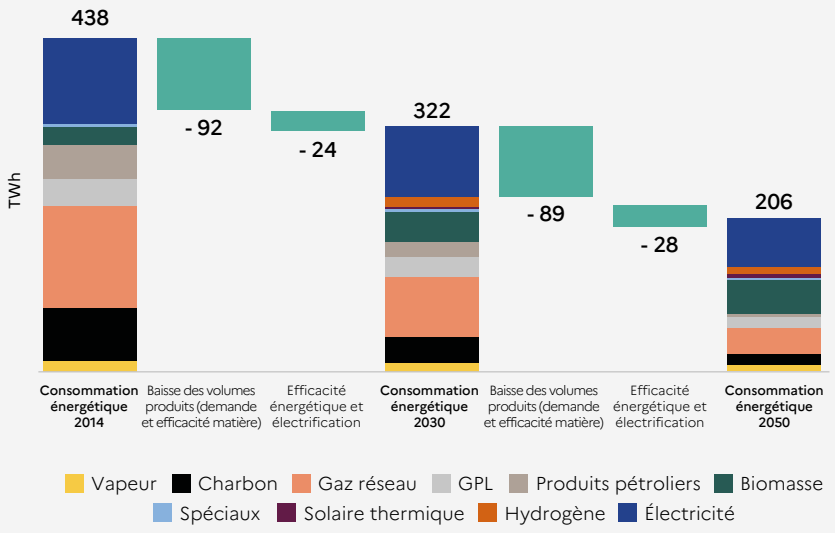
Par ailleurs, sous l'effet d'une hausse du prix du carbone dès 2030, plusieurs sites de captage de CO_2 sont mis en place dans des industries aux émissions de CO_2 difficiles à abattre (sidérurgie, cimenterie) ou très concentrées (production d'engrais), à hauteur de 2,1 $MtCO_2$ captées par an. Ces émissions captées sont transportées pour un stockage en mer du Nord.

Graphique 7 Trajectoires d'évolution de la demande en aluminium, acier, ciment et verre par secteur consommateur dans le scénario tendanciel



5.2. Scénario 1: une production contractée et un marché réorienté vers le « made in France »

Graphique 8 Décomposition par levier des baisses de consommation énergétique dans S1, entre 2014 et 2050[33]



Dans ce scénario, **le moteur du changement est opéré par le citoyen**, dont le mode de vie plus sobre se traduit par une **réduction drastique de la demande** en biens d'équipements et de consommation et par un rejet des produits les moins respectueux de l'environnement. Ce scénario s'inscrit dans un contexte de **montée du protectionnisme**, favorisé par le double souhait d'une maîtrise de l'empreinte carbone nationale et d'un regain de souveraineté. En conséquence, le « **made in France** » est favorisé et le solde commercial physique atteint l'équilibre dans presque toutes les industries lourdes françaises en 2050. L'ensemble de ces mutations implique une réduction du nombre de produits, en cohérence avec la volonté citoyenne de sobriété et donc une hausse des prix généralement acceptée par les consommateurs.

UNE CAPACITÉ DE PRODUCTION INDUSTRIELLE CONTRACTÉE ET RELOCALISÉE AUTOUR DES BESOINS DE CITOYENS EN QUÊTE DE SOBRIÉTÉ

- **Demande**. La demande en produits manufacturés se contracte fortement avec l'évolution des modes de vie. En particulier :

1. l'arrêt quasi total (- 99,6 %) des **constructions neuves** en 2050 (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) réduit fortement la demande en ciment (- 83 %), acier (- 62 %) et plastiques (- 76 % pour le dichlore, - 77 % pour l'éthylène) dans ce secteur. La hausse du rythme de rénovation (90 % des logements existants sont rénovés en 2050) ne compense cette évolution que marginalement ;

2. le recul des ventes de **véhicules particuliers** (- 44 % en 2050) et des trajets aériens (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*) se répercute sur l'ensemble de la chaîne de valeur des industries du transport, influant particulièrement sur la demande de ce secteur en acier (- 61 %) et en plastiques (- 43 % pour l'éthylène). Pour autant, la réduction du poids des véhicules entraîne un remplacement de l'acier par l'aluminium, à hauteur de 13 % de la masse des véhicules en 2050, limitant le recul de la demande en aluminium en provenance du secteur des transports (- 12 %) ;

3. l'interdiction de la mise sur le marché des **emballages plastiques à usage unique** (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*) implique un arrêt quasi total des consom-

33 Les consommations d'hydrogène ne sont pas représentées en 2014 : une part des consommations de gaz réseau est mobilisée pour leur production. En 2019, les consommations d'hydrogène de l'industrie (hors raffinage) représentent près de 10 TWh, dont trois quarts sont dédiées à la production d'engrais et un quart à la production de méthanol.

mations de plastique pour les emballages (- 98 % pour l'éthylène), avec un faible report vers d'autres matériaux en raison d'une baisse globale de la consommation d'emballages[34] ;

4. la modification des pratiques agricoles et des comportements alimentaires (*cf.* chapitres *2.1.4. Alimentation* et *2.2.1. Production agricole*) entraîne une réduction de l'usage d'ammoniac pour la **fabrication d'engrais** azotés (- 40 %).

- **Commerce international**. La montée du protectionnisme, alimentée par le développement du « made in France », limite le recul du solde commercial français des produits d'industrie lourde (IGCE) à un taux S/P (hors sucre) de - 4 %, contre - 10 % dans le scénario tendanciel. L'ensemble des industries lourdes retrouve un solde commercial nul ou positif (sucre) en volume physique, à l'exception des secteurs de l'ammoniac (S/P = - 30 % en 2050), en raison de l'important déficit existant en 2014 (S/P = - 77 %), et du papier-carton (- 12 % en 2050 contre - 20 % en 2014), en raison d'un manque de disponibilité en biomasse. Ce scénario permet ainsi de « relocaliser » la production en France et de réduire la dépendance aux importations. Pour autant, elle ne s'accompagne pas d'un accroissement du nombre de sites industriels sur le territoire : le tissu industriel existant suffit, dans l'ensemble, à fournir une demande française en net repli.

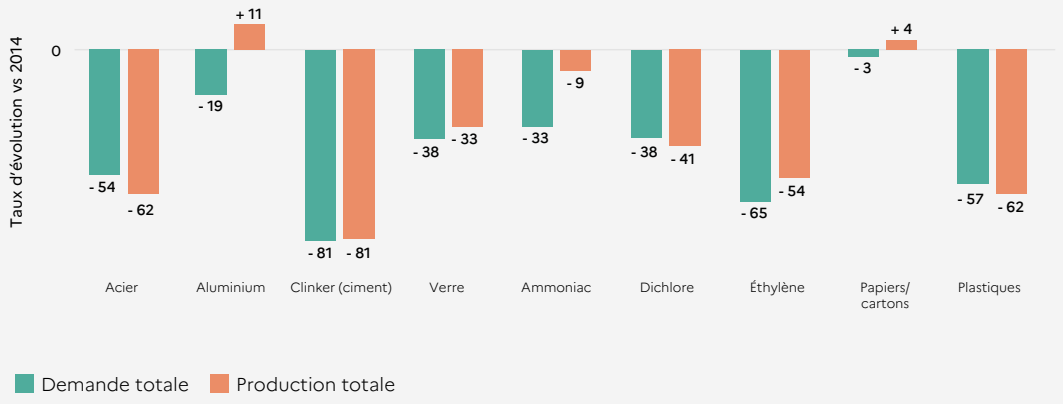
- **Évolution de la production en volume, en produit, en localisation**. La relocalisation partielle des activités industrielles modère le recul des niveaux de production *(Graphique 9)*. Pour les secteurs de l'aluminium et des papiers-cartons, la relocalisation permet même d'envisager une hausse de la production en dépit d'une plus faible demande domestique (respectivement + 11 % et + 4 % en 2050 par rapport à 2014). Les secteurs les plus durement touchés sont le ciment (- 81 %) et l'acier (- 62 %), compte tenu du quasi-arrêt de constructions neuves en 2050 et de la baisse très importante du nombre de nouveaux véhicules particuliers. Dans la plupart des secteurs industriels, la baisse drastique de la demande est donc fortement répercutée sur les niveaux de production. En conséquence, l'activité économique tend à se territorialiser en lien avec trois dynamiques :

1. un **transfert d'activité** s'opère vers les industries agroalimentaires des fruits et légumes, à la faveur de l'évolution des régimes alimentaires et vers les filières de matériaux recyclés (aluminium secondaire, plastiques recyclés). En outre, des sites ouvrent pour la production de méthanol ainsi que pour la synthèse d'oléfines à partir de bioéthanol ;

2. une **préservation de sites industriels**, fonctionnant parfois en sous-capacité[35], est assurée grâce à la mobilisation des collectivités, soucieuses de conserver les bassins d'emplois locaux et d'assurer une proximité entre l'offre et la demande de produits ;

3. un **transfert d'emplois** s'effectue, de façon quantitative, vers de petites industries ou en dehors du secteur industriel, compensant les fermetures de sites, avec une redynamisation du tissu productif à échelle territoriale autour d'emplois artisanaux et de l'économie circulaire (réparation/réemploi, tri, collecte, etc.).

Graphique 9 Évolution (en %) des volumes totaux de demande et de production des industries lourdes (IGCE) en 2050 dans S1 par rapport à 2014[36]



34 Baisses de demande en emballages pour l'aluminium (- 48 %), le verre (- 42 %), le papier (- 15 %).
35 En particulier les cimenteries.
36 La catégorie « vapocraquage » se réfère à la production des oléfines constitutives des plastiques (éthylène, propylène, benzène, etc.) par vapocraquage.

UN DÉVELOPPEMENT LIMITÉ DE TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION : DES INNOVATIONS TIRÉES PAR L'ÉVOLUTION DES MODES DE CONSOMMATION, MAIS LIMITÉES DANS UN CONTEXTE DE RECUL DE PRODUCTION

Devant les exigences des consommateurs, les entreprises du B2C (*Business to Consumer*) imposent à leurs fournisseurs de plus en plus de critères liés à l'origine et à l'empreinte carbone de leurs produits. Ainsi, si les investissements décarbonés ne sont pas économiquement rentables à court terme, notamment dans un contexte de recul de la demande, ils restent nécessaires pour préserver ou acquérir des parts de marché.

- **Efficacité matière**. Le déchet est perçu comme une ressource et fait l'objet de pratiques de tri avancées de la part des citoyens et des centres de tri, bien que peu de nouvelles technologies soient mises en place (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*). Les produits d'occasion ainsi que la réparation et le réemploi deviennent la norme. Au total, les secteurs de l'acier, de l'aluminium, du verre, du papier-carton et du plastique incorporent ainsi des matières recyclées à hauteur de 70 % de leurs tonnages cumulés.
  Toutefois, les baisses de production, en lien notamment avec l'abandon des plastiques à usage unique, et la réduction des volumes de déchets produits par les citoyens font apparaître une tension sur le gisement de déchets recyclables requérant une limitation des exportations de déchets.

- **Efficacité énergétique**. Les industriels investissent dans l'efficacité énergétique afin de conserver des parts de marché, de verdir leur image, mais aussi pour faire des économies d'OPEX[37] sur les coûts énergétiques, dans un contexte de baisse de la demande.Néanmoins, en l'absence d'un soutien fort de l'État pour une relance industrielle, les efforts d'efficacité énergétique n'atteignent pas leurs potentiels maximaux (75 % du potentiel est atteint), en raison :

  1. de perspectives réduites quant au développement de marchés, grevant les capacités d'investissement pour la performance énergétique ;
  2. de la préservation de sites industriels peu efficaces afin de soutenir leur ancrage local (bassins d'activité et d'emplois, valorisation des déchets des collectivités) ;
  3. de la préservation de sites industriels fonctionnant en sous-capacité de production, pour les mêmes raisons.

- **Mix énergétique**. Le mix énergétique évolue avec une forte pénétration de la biomasse, notamment dans les chaudières, une progression du gaz naturel (décarboné à 83 %) dans les procédés, un recul des produits pétroliers et la poursuite des tendances d'électrification. Le solaire thermique progresse également, notamment pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire, à hauteur de 5 TWh en 2050.

- **Usage d'hydrogène**. L'utilisation d'hydrogène dans l'industrie progresse peu par rapport à 2019, en raison d'une augmentation de la production de méthanol compensée par une baisse de production d'engrais, et atteint 11 TWh en 2050 (+ 10 %). Par ailleurs, pour ces usages industriels, l'hydrogène reste produit par reformage de gaz du réseau, qui est fortement décarboné (*cf.* chapitre *2.3.1. Mix gaz*). Il s'agit du procédé actuel, que l'on préserve en raison de sa robustesse et afin de limiter les investissements[38]. Ces évolutions permettent de relocaliser l'intégralité de la consommation française de méthanol (essentiellement importée actuellement).

- **Captage et stockage géologique du CO_2**. Dans ce scénario, le stockage géologique de CO_2 n'est pas mis en œuvre en raison des fortes résistances qu'il suscite et de son coût.

- **Captage et valorisation du CO_2**. La valorisation du CO_2 est mobilisée pour la production de méthanol dans l'industrie chimique, à hauteur de 711 ktCO_2 par an en 2050. Le captage de CO_2 valorisé est essentiellement d'origine biogénique (unités de méthanisation, bioraffineries) et est réparti sur l'ensemble du territoire, en l'absence d'infrastructures de transport du CO_2.

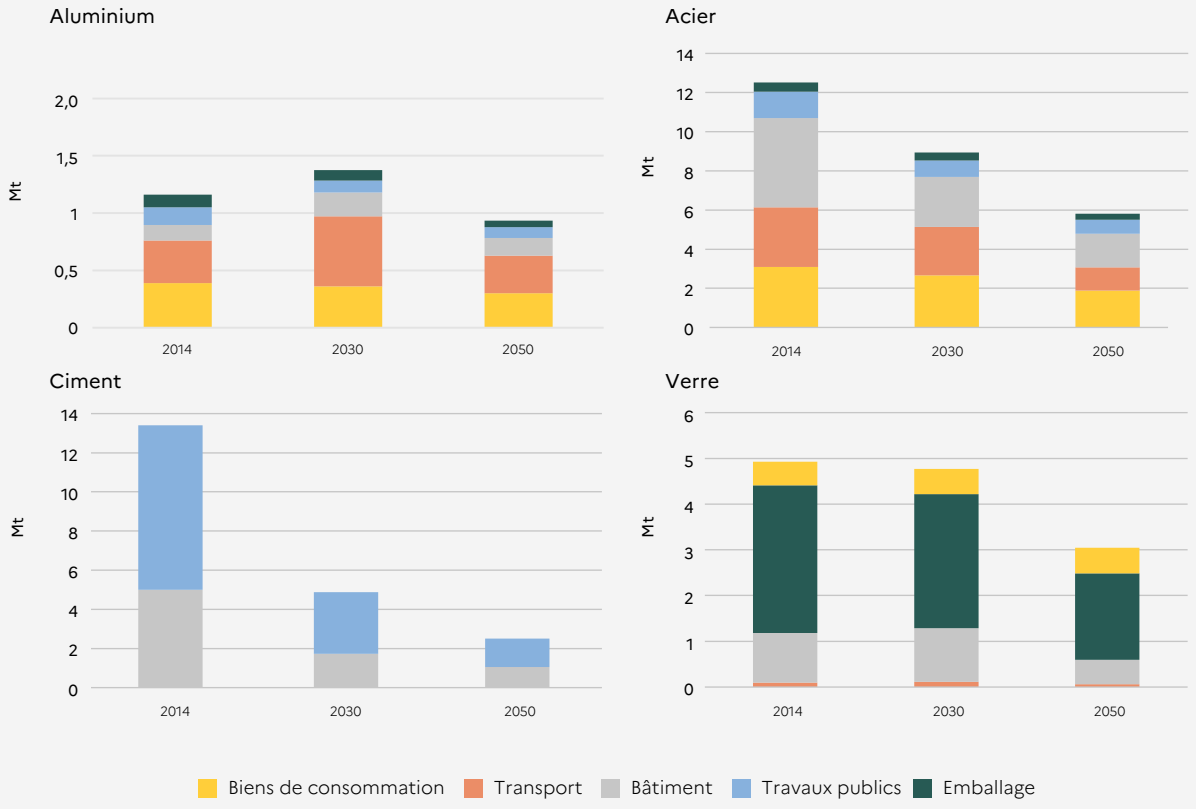
37 Dépenses d'exploitation (*Operational Expenditures*).
38 Cette hypothèse peut sembler contre-intuitive, une partie du gaz réseau étant elle-même produite à partir d'hydrogène (par électrolyse). Cela s'explique par une volonté de décarbonation du gaz réseau pour tous les usages, poussée par les technologies *power-to-gas*, qui requièrent des tailles d'électrolyseurs réduites, de l'ordre du mégawatt, principalement adossées aux installations de méthanisation (*cf.* chapitres *2.3.1. Mix gaz* et *2.3.5. Hydrogène*). Ces tailles d'électrolyseurs ne sont pas compatibles avec une utilisation industrielle directe, associée à des volumes importants (au-delà de 100 MW).

Trajectoires : illustration de points de passage en 2030

Dans ce scénario basé sur un « choc de la demande », les évolutions de la production industrielle *(Graphique 10)* sont principalement liées aux évolutions de la demande des secteurs des transports (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), du bâtiment (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) et des emballages (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*). En particulier :

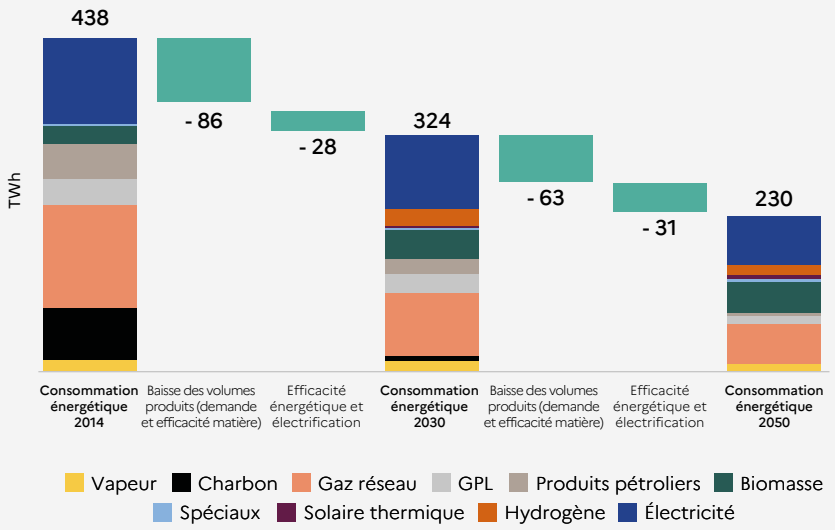
- **la demande en aluminium** suit la production de véhicules et croît de 18 % entre 2014 et 2030, avant de décroître de 32 % entre 2030 et 2050 ;
- **la demande en ciment** suit l'évolution des constructions neuves et se réduit drastiquement dès l'horizon 2030 (recul de 64 % entre 2014 et 2030, sur les 81 % de baisse entre 2014 et 2050) ;
- **la demande en verre** reste stable (- 3 %) entre 2014 et 2030 mais diminue fortement (- 36 %) entre 2030 et 2050 en raison des évolutions du secteur des emballages, remis en question avec la fin des plastiques à usage unique en 2040 et le développement de la réutilisation.

Graphique 10 Trajectoires d'évolution de la demande en aluminium, acier, ciment et verre par secteur consommateur dans S1



5.3. Scénario 2 : des chaînes de valeur réindustrialisées et spécialisées par région sous l'impulsion des pouvoirs publics

Graphique 11 Décomposition par levier des baisses de consommation énergétique dans S2, entre 2014 et 2050[39]



Dans ce scénario, **la transition écologique est planifiée par les pouvoirs publics**, particulièrement à l'échelon régional, mais également aux niveaux national et européen. Ce mouvement est impulsé par la mobilisation des citoyens, des salariés, et donc de l'ensemble de la société civile, autour d'un nouveau projet de société. En découle la mise en œuvre d'une politique industrielle forte et cohérente avec les enjeux écologiques. Cela permet de **réorganiser le paysage productif** en accompagnant et finançant notamment les modernisations, reconversions et éventuelles fermetures de sites. Ces transformations suivent une logique poussée d'**efficacité** (énergétique, matière) et d'optimisation du maillage du territoire. Ainsi, les chaînes de valeur industrielles sont repensées au prisme de **spécialisations régionales**, porteuses de synergies locales et d'une attention forte portée aux filières d'**économie circulaire**. Enfin, cette transition s'accompagne d'une **réindustrialisation** dans certains secteurs ciblés pour développer l'industrie bas carbone française. Ce positionnement sur ces marchés bas carbone stimule la production correspondante par une amélioration des soldes commerciaux et de nouvelles exportations.

PRODUCTION : UN ACCOMPAGNEMENT AMBITIEUX DES POUVOIRS PUBLICS DANS UNE LOGIQUE DE RÉINDUSTRIALISATION CIBLÉE ET DE COOPÉRATION TERRITORIALE AVEC LES INDUSTRIELS

- **Demande**. La demande domestique en produits manufacturés se contracte fortement, suivant l'évolution des modes de vie, de la réglementation et de l'organisation du territoire (niveau d'urbanisation, déploiement d'infrastructures...). En particulier :

1. la baisse importante (- 85 %) de la **construction neuve** en 2050 (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) réduit la demande en ciment (- 75 %), acier (- 58 %) et dichlore (- 83 %) en provenance de ce secteur ;

2. le recul des ventes de **véhicules particuliers** et des trajets aériens (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*) se répercute sur l'ensemble de la chaîne de valeur des industries du transport, influant particulièrement sur la demande en acier (- 45 %) et en plastiques (- 62 % pour l'éthylène) en provenance de ce sec-

39 Les consommations d'hydrogène ne sont pas représentées en 2014 : une part des consommations de gaz réseau est mobilisée pour leur production. En 2019, les consommations d'hydrogène de l'industrie (hors raffinage) représentent près de 10 TWh, dont trois quarts sont dédiées à la production d'engrais et un quart à la production de méthanol.

teur. Pour autant, la réduction du poids des véhicules entraîne un remplacement de l'acier par de l'aluminium, à hauteur de 13 % de la masse des véhicules en 2050, engendrant une augmentation sensible de la demande des transports en aluminium (+ 25 %) ;

3. l'interdiction de la mise sur le marché des emballages plastiques à usage unique (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*) implique un arrêt quasi total des consommations de plastique pour les **emballages** (- 99 % pour l'éthylène), provoquant un report partiel vers les emballages en papier (+ 7 %) ;

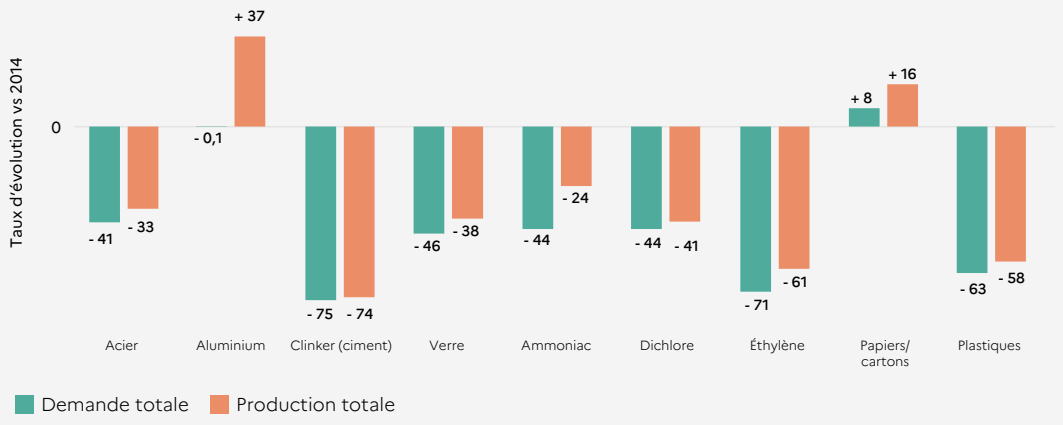
4. la modification des pratiques agricoles et des comportements alimentaires entraîne une réduction de l'usage d'ammoniac pour la fabrication d'engrais azotés (- 55 %). Même évolution pour les produits issus des industries agroalimentaires (*cf.* chapitre *2.1.4. Alimentation* et *2.2.1. Production agricole*).

- **Commerce international**. Des mesures de soutien et un protectionnisme ciblé sont impulsés par les pouvoirs publics afin de préserver l'industrie face à la contraction de la demande. En outre, par une volonté de rayonnement de la France à l'international autour de produits et technologies décarbonés, certains secteurs stratégiques entrent dans une dynamique de réindustrialisation. Résultat d'avantages comparatifs favorables aux produits bas carbone français et de négociations européennes ainsi qu'à l'OMC, les IGCE deviennent globalement exportatrices, présentant un solde commercial positif équivalent à 7 % de leur volume physique total de production (hors sucre), contre un taux S/P importateur de - 10 % dans le scénario tendanciel. Ce regain de souveraineté est notamment porté parmi les IGCE par l'exportation d'aciers plats (S/P = 50 %, contre 0 % dans le scénario tendanciel) et de verre (S/P = 5 %, contre - 9 %). Hors IGCE, les produits ou équipements bas carbone issus des secteurs des métaux, des transports, de la chimie, du textile ou de l'électronique figurent parmi les principaux bénéficiaires de cette nouvelle dynamique.

- **Évolution de la production en volume, en produit, en localisation**. La dynamique de réindustrialisation modère le recul des niveaux de production de certains produits bas carbone *(Graphique 12)*, voire les rehausse, notamment dans les secteurs de l'aluminium (+ 37 % en 2050 par rapport à 2014), du papier-carton (+ 16 %), du bois, de la fonderie, des engrais, des transports, du textile ou de certaines industries agroalimentaires. Néanmoins, dans la plupart des secteurs industriels, la baisse drastique de la demande se répercute sur les niveaux de production. En conséquence, l'activité économique se territorialise à une maille régionale et nationale en lien avec trois dynamiques :

1. un **transfert d'activité** s'opère dans l'industrie lourde vers des filières secondaires ou dans des développements sectoriels spécifiques. Ainsi, dans le secteur de l'acier, les hauts fourneaux sont fermés. La production d'acier se recentre alors sur la filière secondaire (fours à arc électrique), mais surtout dans le développement d'une nouvelle filière : la réduction directe d'acier par hydrogène (DRI). De nouveaux sites et filières sont également créés pour la production de méthanol[40] à partir d'hydrogène et pour accueillir de nouvelles activités liées à l'économie circulaire ;

Graphique 12 Évolution (en %) des volumes totaux de demande et de production des industries lourdes (IGCE) en 2050 dans S2 par rapport à 2014[41]



40 Non destiné à la production d'oléfines.
41 La catégorie « vapocraquage » se réfère à la production des oléfines constitutives des plastiques (éthylène, propylène, benzène, etc.) par vapocraquage.

2. des **synergies à l'échelle territoriale** se développent autour de hubs industriels, dans une optique d'écologie industrielle et territoriale (EIT) ;

3. un **transfert d'emplois** s'effectue, de façon quantitative, vers les nouvelles filières bas carbone dynamisées par la mise en cohérence des politiques industrielles et écologiques, qu'il s'agit d'accompagner en matière d'**évolution des compétences**.

TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION : DES STRATÉGIES D'ACCÉLÉRATION DES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES BAS CARBONE ACCOMPAGNÉES ET FINANCÉES PAR LES POUVOIRS PUBLICS

Soutenue par les citoyens, la modernisation de l'industrie est accompagnée et financée par les pouvoirs publics. Le développement de la commande publique bas carbone permet de sécuriser une part des marchés des industriels, offrant davantage de visibilité et favorisant l'investissement dans des technologies plus performantes.

- **Efficacité matière**. Sous l'effet de la planification publique, les filières d'économie circulaire sont fortement développées. Les filières industrielles secondaires profitent de la disponibilité et de la qualité des matériaux recyclés (ferraille, aluminium recyclé). Au total, les secteurs de l'acier, de l'aluminium, du verre, du papier-carton et du plastique incorporent ainsi des matières recyclées à hauteur de 80 % de leurs tonnages cumulés.

  Toutefois, les baisses de production, en lien notamment avec l'abandon des emballages plastiques à usage unique, font apparaître une tension sur le gisement de déchets recyclables, en raison de ces forts taux d'incorporation. Le déchet prend ainsi une valeur économique et est préservé, notamment par la limitation de ses exportations.

- **Efficacité énergétique**. L'efficacité énergétique est poussée au maximum de son potentiel grâce au soutien de l'État et à l'organisation territoriale.

- **Mix énergétique**. Le mix énergétique évolue avec une forte pénétration de la biomasse, un retrait des produits pétroliers et la poursuite des tendances d'électrification. Le solaire thermique progresse également, notamment pour le chauffage des locaux et l'eau chaude sanitaire.

- **Usage d'hydrogène**. Aux usages traditionnels de l'hydrogène, bien que réduits dans la production d'engrais, s'ajoute un usage en sidérurgie dans la nouvelle filière de réduction directe d'acier (DRI), pour atteindre une consommation totale de 24 TWh en 2050 (contre 10 TWh en 2019). L'ensemble des productions d'hydrogène est assuré par électrolyse de l'eau à cette échéance.

- **Captage et stockage géologique du CO_2**. Dans ce scénario, des procédés aux émissions incompressibles subsistent malgré les importantes transformations des outils de production (ex. : dans les cimenteries). Un très faible développement du CCS (2,8 $MtCO_2$ en 2050) est donc mis en place afin de capter et stocker le CO_2 en mer du Nord. Une part de ces émissions captées (0,7 $MtCO_2$) correspond à des émissions négatives (CCS sur des chaudières biomasse ou de gaz de réseau – BECCS).

- **Captage et valorisation du CO_2**. La valorisation du CO_2 est mobilisée pour la production de méthanol dans l'industrie chimique, à hauteur de 652 $ktCO_2$ par an en 2050. Le captage de CO_2 valorisé est essentiellement d'origine biogénique, car les unités de méthanisation et bioraffineries sont bien réparties sur l'ensemble du territoire, permettant d'éviter la construction d'infrastructures de transport du CO_2.

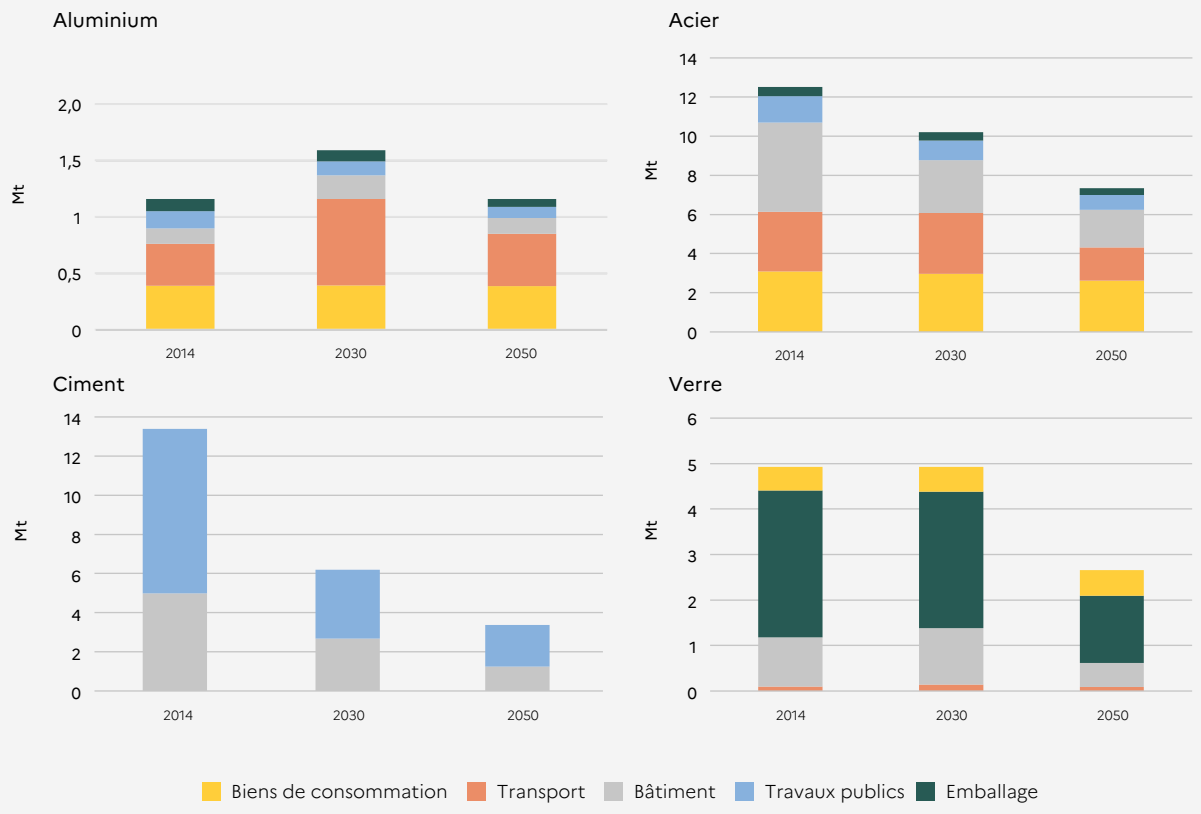
Trajectoires : illustration de points de passage en 2030

Les évolutions de la production industrielle *(Graphique 13)* sont fortement liées aux évolutions de la demande des secteurs des transports (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), du bâtiment (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) et des emballages (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*). En particulier :

- **la demande en aluminium** suit la production de véhicules et croît de 37 % entre 2014 et 2030, avant de décroître de 27 % entre 2030 et 2050 ;
- **la demande en ciment** suit l'évolution des constructions neuves et se réduit drastiquement dès l'horizon 2030 (recul de 54 % entre 2014 et 2030, sur les 75 % de baisse entre 2014 et 2050) ;
- **la demande en verre** reste constante entre 2014 et 2030 mais est réduite de moitié entre 2030 et 2050 en raison des évolutions du secteur des emballages, remis en question avec la fin des plastiques à usage unique en 2040 et le développement de la réutilisation.

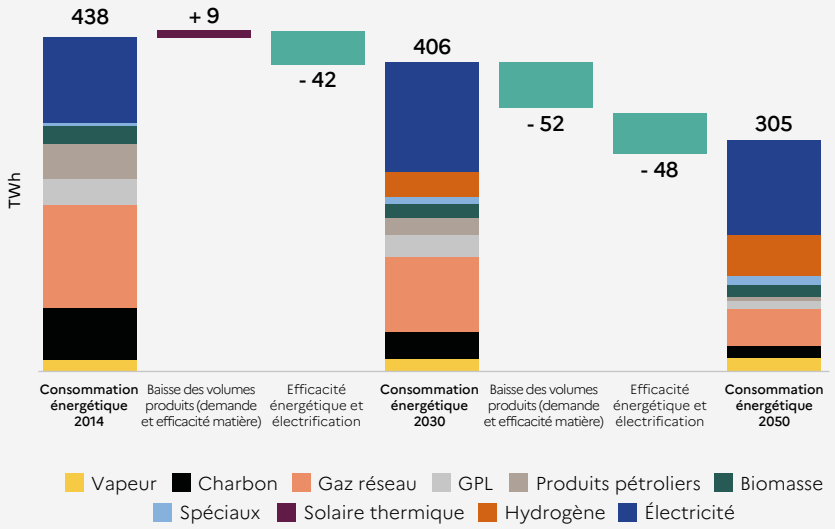
Par ailleurs, sous l'effet d'une hausse du prix du carbone dès 2030 et de l'accompagnement d'une collectivité territoriale, deux sites démonstrateurs de captage de CO_2 sont mis en place dans des industries aux émissions de CO_2 difficiles à abattre (sidérurgie) ou très concentrées (production d'engrais), à hauteur de 0,5 $MtCO_2$ captées par an. Ces émissions captées sont transportées pour un stockage en mer du Nord.

Graphique 13 Trajectoires d'évolution de la demande en aluminium, acier, ciment et verre par secteur consommateur dans S2



5.4. Scénario 3 – une poursuite des tendances de consommation permise par la décarbonation du mix énergétique

Graphique 14 Décomposition par levier des baisses de consommation énergétique dans S3, entre 2014 et 2050[42]



Dans ce scénario, **la décarbonation de l'industrie est majoritairement obtenue grâce à la décarbonation de l'offre énergétique**, afin de peser de façon moindre sur **les modes de consommation actuels**. La disponibilité en électricité décarbonée favorise l'électrification des procédés industriels et le recours à l'hydrogène. Pour accompagner cette mutation du système énergétique, les industries développent des technologies d'efficacité énergétique et ont recours à l'effacement. Les pouvoirs publics accompagnent ces changements par la mise en place d'outils et de cadres incitatifs. **Les échanges commerciaux se concentrent dans l'Union européenne**, où les avantages comparatifs entre pays amènent des spécialisations industrielles nationales, mais se maintiennent à volume physique et solde constant.

PRODUCTION : UN RECUL SENSIBLE DE LA DEMANDE DANS L'INDUSTRIE LOURDE ABAISSANT LES NIVEAUX DE PRODUCTION DÉJÀ AFFECTÉS PAR LA DÉSINDUSTRIALISATION, INDÉPENDAMMENT DES POLITIQUES CLIMATIQUES

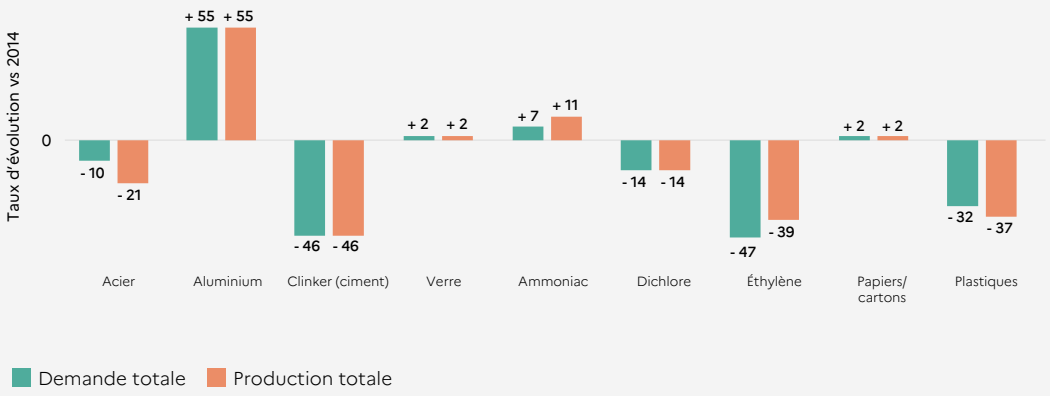
- **Demande.** Les réglementations prenant effet sur la période et les évolutions démographiques induisent une réduction significative de la demande industrielle pour les secteurs des emballages et de la construction. Ces effets masquent cependant le maintien de tendances haussières dans la consommation de certains produits industriels. Dans l'industrie lourde, le secteur de l'aluminium voit sa demande en provenance des transports plus que doubler. Il devient stratégique dans le cadre d'une production de haute qualité à destination des réseaux électriques et de l'électronique. En outre, la demande en ammoniac (plastiques thermodurcissables et polyuréthane) progresse de 7 % par rapport à 2014 sous l'effet, notamment, de la dynamisation du secteur des transports et des hausses de consommation en biens d'équipement.

- **Commerce international**. Les échanges commerciaux se recentrent en Europe et s'intensifient, mais les IGCE restent globalement importatrices, avec un solde commercial négatif matérialisé par un taux S/P de - 6 %.

42 Les consommations d'hydrogène ne sont pas représentées en 2014 : une part des consommations de gaz réseau est mobilisée pour leur production. En 2019, les consommations d'hydrogène de l'industrie (hors raffinage) représentent près de 10 TWh, dont trois quarts sont dédiées à la production d'engrais et un quart à la production de méthanol.

- **Évolution de la production en volume, en produit, en localisation**. La production industrielle poursuit son recul dans la plupart des secteurs *(Graphique 15)*, à l'exception des secteurs de l'aluminium, de l'automobile, des plastiques recyclés, du bois et de la fonderie. Le dynamisme de la filière aluminium permet l'ouverture d'un site de production primaire (smelter), permise par le faible prix de l'électricité et les aides à l'OPEX de l'État. La pilotabilité de ces sites offre des capacités de flexibilité, en synergie avec le développement des réseaux électriques et des énergies renouvelables intermittentes. En outre, de nouvelles filières se créent pour la production décarbonée d'éthylène à partir de méthanol – produit à partir d'hydrogène et de CO_2 capté *(methanol-to-olefins)* et de bioéthanol.

Graphique 15 Évolution (en %) des volumes totaux de demande et de production des industries lourdes (IGCE) en 2050 dans S3 par rapport à 2014[43]



TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION : UNE DÉCARBONATION DU MIX ÉNERGÉTIQUE SOUTENUE PAR L'ÉTAT ET DES EFFORTS PARTIELS D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ENCOURAGÉS PAR LES PROBLÉMATIQUES DE COMPÉTITIVITÉ

Les pouvoirs publics offrent leur soutien à la modernisation des sites industriels par le biais d'aides au CAPEX et à l'OPEX. En outre, l'environnement concurrentiel des industries motive le développement d'innovations afin de réduire les coûts énergétiques.

- **Efficacité matière**. Les efforts en efficacité matière suivent les tendances actuelles. Au total, les secteurs de l'acier, de l'aluminium, du verre, du papier-carton et du plastique incorporent des matières premières de recyclage à hauteur de 60 % de leurs tonnages cumulés (contre 45 % en 2014).

  Toutefois, certaines hausses de production (secteur de l'aluminium notamment) se confrontent à une tension sur le gisement de déchets recyclables utilisables. Des importations de déchets comme matières premières sont donc mobilisées, en provenance d'Europe.

  Par ailleurs, c'est dans ce scénario que la technologie d'anode inerte dans le secteur de l'aluminium a été envisagée. Celle-ci permet de supprimer les émissions de CO_2 liées à la consommation de l'anode en carbone lors du procédé d'électrolyse de l'aluminium.

- **Efficacité énergétique**. Des efforts en efficacité énergétique sont mis en place à hauteur de 75 % du potentiel maximal afin de réaliser des économies sur les coûts de l'énergie et de préserver la compétitivité.

- **Mix énergétique**. Les aides à l'OPEX des pouvoirs publics permettent de développer l'électrification des procédés industriels. Les chaudières sont également totalement électrifiées. À l'inverse de S1 et S2, l'usage de gaz est privilégié face à la biomasse dans le cadre d'une forte décarbonation de l'offre de gaz réseau.

- **Usage d'hydrogène**. Aux usages traditionnels de l'hydrogène, dans la production d'engrais et de méthanol, s'ajoute le développement de la filière *methanol-to-olefins* (MTO) ainsi qu'un usage en sidérurgie en tant que réducteur dans les hauts fourneaux. Aussi ce scénario considère-t-il une forte poussée du vecteur hydrogène dans l'industrie, à hauteur de 54 TWh (contre 10 TWh en 2019), dont 35 TWh dans le cadre de la construction de la nouvelle filière MTO (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*).

43 La catégorie « vapocraquage » se réfère à la production des oléfines constitutives des plastiques (éthylène, propylène, benzène, etc.) par vapocraquage.

- **Captage et stockage géologique du CO_2**. Dans ce scénario, les faibles transformations des procédés industriels font subsister des émissions incompressibles liées aux procédés (ex. : cimenteries) et à la consommation d'énergies fossiles (ex. : hauts fourneaux). Soutenu par l'État, le CCS se développe, à hauteur de 10,3 $MtCO_2$ en 2050, dans les zones industrielles fortement émissives et permettant un stockage à proximité. Le développement du stockage géologique de CO_2 sur le sol français rencontre moins de résistance parmi les populations, en partie du fait de l'intensification des enjeux d'adaptation au changement climatique. Ainsi, une partie des émissions est captée dans le Nord (Dunkerque, Le Havre), transportée puis stockée en mer du Nord, mais également dans le Bassin parisien. Une autre est captée et stockée directement dans le Bassin aquitain, qui connaît une relocalisation d'industries afin d'éviter le développement d'un réseau de transport de CO_2 sur le territoire. Une part de ces émissions captées (2,6 $MtCO_2$) correspond à des émissions négatives (BECCS).
- **Captage et valorisation du CO2**. La valorisation du CO_2 se développe fortement afin d'alimenter le développement de la nouvelle filière MTO, à hauteur de 3,6 $MtCO_2$ par an. Elle est en outre toujours mobilisée pour la production de méthanol à destination des usages traditionnels de l'industrie chimique (746 $ktCO_2$ par an), de façon équivalente aux autres scénarios. Au total, ce sont donc 4,4 Mt de CO_2 qui sont valorisées en 2050. Des sources de CO_2 d'origine biogénique permettent toujours de répondre à cette importante demande, en raison du fort développement de l'utilisation de biomasse dans ce scénario (bioraffineries en particulier). Les sources de CO_2 biogéniques sont choisies à proximité des sites de l'industrie chimique (ex. : vallée de la chimie en Auvergne-Rhône-Alpes) afin de limiter le besoin en infrastructures de transport du CO_2.

Trajectoires : illustration de points de passage en 2030

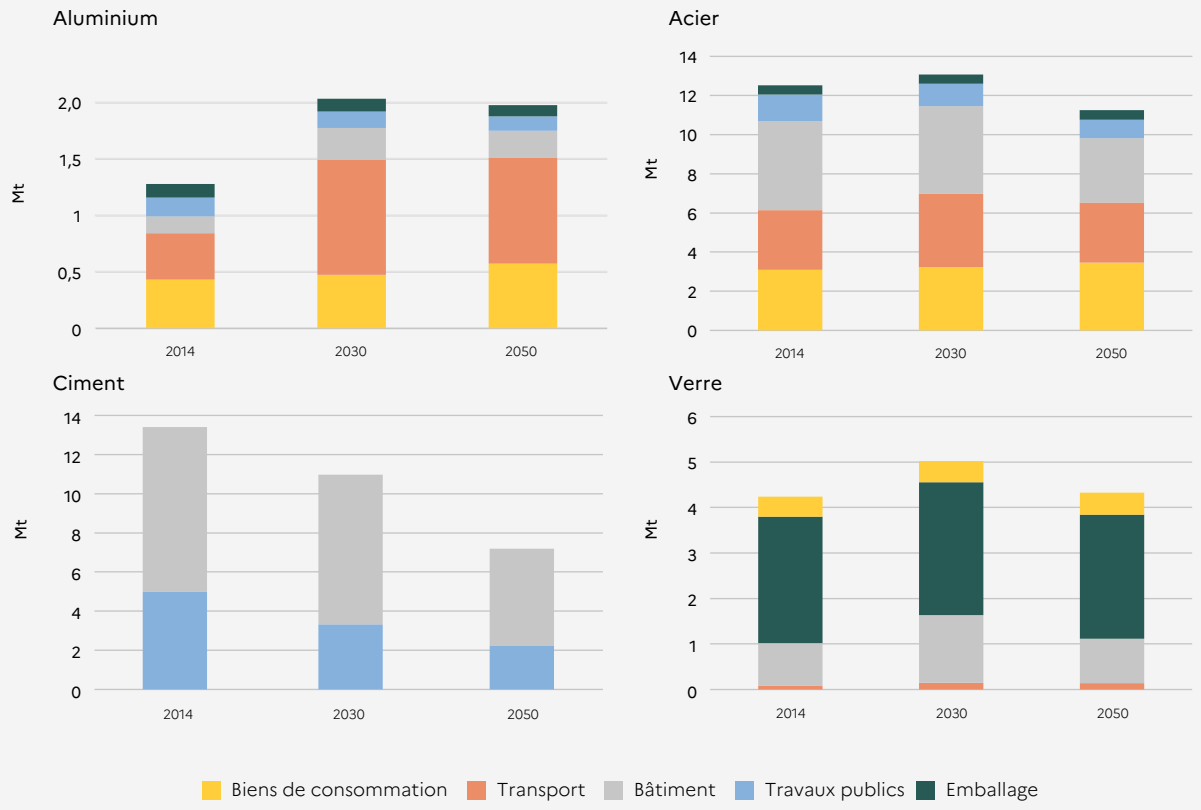
Les évolutions de la production industrielle *(Graphique 16)* sont fortement liées aux évolutions de la demande des secteurs des transports (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), du bâtiment (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) et des emballages (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*). En particulier :

- **la demande en aluminium** suit la production de véhicules et croît de 59 % entre 2014 et 2030, avant de se stabiliser (-3 %) entre 2030 et 2050 ;
- **la demande en ciment** suit l'évolution des constructions neuves et se réduit dès l'horizon 2030 (- 18 % entre 2014 et 2030), mais surtout entre 2030 et 2050 (- 34 %) ;
- **la demande en verre** progresse de 18 % entre 2014 et 2030 mais se réduit ensuite (- 14 % entre 2030 et 2050) avec le développement de la réutilisation des emballages.

Par ailleurs, de nouveaux usages centralisés et fortement consommateurs d'hydrogène apparaissent dès 2030, nécessitant la construction rapide d'un réseau de transport et de stockage d'hydrogène afin de mettre en relation les producteurs et les consommateurs.

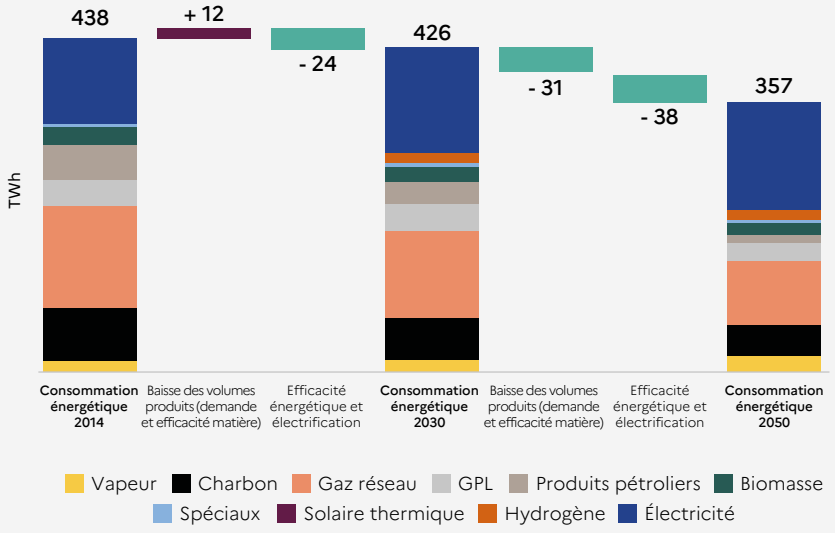
En outre, sous l'effet d'une hausse du prix du carbone dès 2030 et d'un accompagnement de l'État pour la décarbonation de l'industrie, les industries aux émissions difficiles à abattre (sidérurgie, cimenterie) et très concentrées (production d'engrais) mettent en place des projets CCS à large échelle, à hauteur de 4,9 $MtCO_2$ captées par an. Les émissions captées sont transportées prioritairement pour stockage en mer du Nord. En complément, des démonstrateurs de sites de stockage se développent dans le Bassin parisien.

Graphique 16 Trajectoires d'évolution de la demande en aluminium, acier, ciment et verre par secteur consommateur dans S3



5.5. Scénario 4 : une décarbonation de l'industrie focalisée sur le captage et le stockage géologique de CO_2, dans un univers où consommation et mondialisation s'intensifient

Graphique 17 Décomposition par levier des baisses de consommation énergétique dans S4, entre 2014 et 2050[44]



Dans ce scénario, la décarbonation de l'industrie est essentiellement permise par le captage du CO_2, afin de permettre une préservation des niveaux de consommation à moindre empreinte. Les quelques leviers de décarbonation choisis forment un pari technologique soutenu par les pouvoirs publics. Outre le captage, le stockage et la valorisation du CO_2, les efforts d'électrification sont accrus. Le nombre de sites de production industrielle diminue et les centres de R&D se développent. La coopération internationale se fait surtout sur quelques filières clés (CCS notamment) et les institutions œuvrent à la diffusion de ces technologies. Les échanges commerciaux et les dynamiques de mondialisation s'intensifient à travers une augmentation des flux de personnes et de matières. Les zones portuaires et les infrastructures routières se développent. En conséquence, le solde commercial de l'industrie lourde se creuse et les délocalisations se poursuivent.

PRODUCTION : DES NIVEAUX DE PRODUCTION ABAISSÉS PAR L'AGGRAVATION DU SOLDE COMMERCIAL ET UNE LÉGÈRE BAISSE DE LA DEMANDE, INDÉPENDANTE DES POLITIQUES CLIMATIQUES

- **Demande**. Les réglementations prenant effet sur la période et les évolutions démographiques entraînent une réduction de la demande industrielle pour les secteurs des emballages plastiques[45] et de la construction. Ces effets masquent cependant le maintien de tendances haussières dans la consommation de certains produits industriels. Dans l'industrie lourde, la dynamisation du secteur des transports provoque un doublement de la demande en verre, un triplement de la demande en aluminium, ainsi qu'un quadruplement de la demande en ammoniac (plastiques thermodurcissables) en provenance de ce secteur.

44 Les consommations d'hydrogène ne sont pas représentées en 2014 : une part des consommations de gaz réseau est mobilisée pour leur production. En 2019, les consommations d'hydrogène de l'industrie (hors raffinage) représentent près de 10 TWh, dont trois quarts sont dédiées à la production d'engrais et un quart à la production de méthanol.

45 Dans le secteur des emballages, l'interdiction des plastiques à usage unique se reporte sur les autres matériaux d'emballages : aluminium, verre, papier.

- **Commerce international**. L'intensification des échanges à échelle mondiale prolonge la dynamique de désindustrialisation face aux problématiques de compétitivité. Les IGCE présentent globalement un solde commercial négatif en volume physique, matérialisé par un taux S/P (hors sucre) de - 14 %, contre - 10 % dans le scénario tendanciel.

- **Évolution de la production en volume, en produit, en localisation**. La hausse globale de la demande ne se répercute pas sur les niveaux de production, qui déclinent en raison de la désindustrialisation et de la progression des importations *(Graphique 18)*. Ainsi, la production d'acier, par exemple, recule de 21 % par rapport à 2014 en dépit d'une hausse de 4 % de la demande intérieure. Des sites ouvrent cependant dans les secteurs fortement dynamisés, tels que la production d'aluminium ou celle d'oléfines à partir de bioéthanol. Les zones disposant de sites de stockage géologique de CO_2 deviennent d'autant plus attractives pour l'ouverture de nouveaux sites.

TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION : UN DÉVELOPPEMENT DU CCS QUI PRIME FACE AUX AUTRES TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION

Le choix des industriels et des pouvoirs publics s'oriente vers un développement privilégié des technologies de captage, stockage et valorisation du CO_2. En raison de leur intensité capitalistique, peu de capitaux restent disponibles pour le développement d'autres technologies. En outre, les consommateurs restent indifférents à l'empreinte écologique des produits, n'induisant pas de concurrence sur la prise en compte de ces critères et acceptent en conséquence l'implantation de zones de stockage ou de lourdes infrastructures CO_2 sur l'ensemble du territoire.

- **Efficacité matière**. Les taux d'incorporation de matières premières de recyclage restent stables.

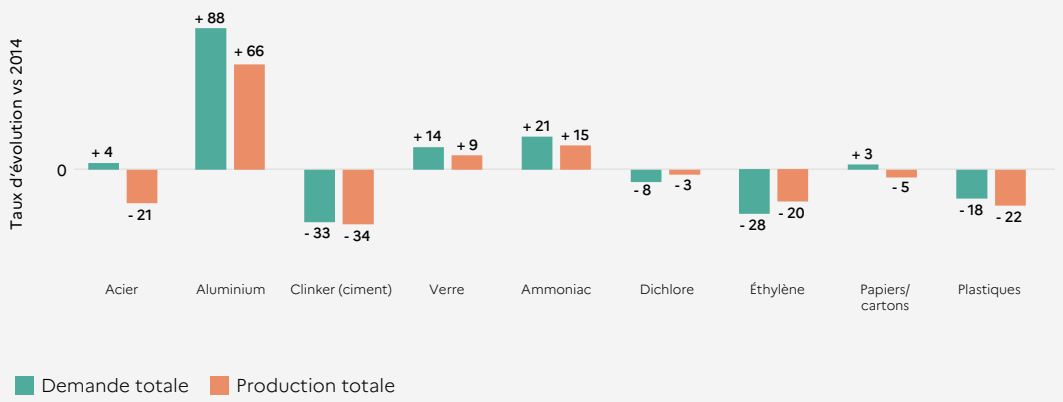
- **Efficacité énergétique**. La pénétration des technologies d'efficacité énergétique reste stable.

- **Mix énergétique**. En l'absence d'aide à l'OPEX et en raison des efforts engagés *via* le captage du CO_2, les niveaux d'électrification ne sont pas poussés à leurs potentiels maximaux. Ils restent globalement tendanciels dans les procédés, progressent légèrement dans les chaudières et sont opportunément exploités pour renforcer l'attractivité du CCS. Par exemple, l'électrification des précalcinateurs est développée dans le secteur du ciment, car elle permet de concentrer les émissions de CO_2 en un gisement captable par les technologies de CCS. En outre, le développement de la biomasse, s'il reste limité, s'opère préférentiellement dans les sites industriels disposant d'équipements de CCS afin d'obtenir des émissions négatives.

- **Usage d'hydrogène**. L'utilisation d'hydrogène dans l'industrie progresse peu par rapport à 2019, en raison d'une augmentation de la production de méthanol compensée par une baisse de production d'engrais, et atteint 12 TWh (+ 25 %). Sa production s'effectue par reformage de gaz du réseau, qui est fortement décarboné par CCS.

- **Captage et stockage géologique du CO_2**. Dans ce scénario, un très fort développement du CCS est assuré, à hauteur de 40,2 $MtCO_2$ en 2050, s'imposant comme la technologie phare de la décarbonation de l'industrie. Soutenu par l'État, un fort développement des infrastructures de transport et de stockage géologique de CO_2 s'opère sur le territoire afin de capter les émissions de l'ensemble des sites industriels et les stocker en France ou en Europe.

Graphique 18 Évolution (en %) des volumes totaux de demande et de production des industries lourdes (IGCE) en 2050 dans S4 par rapport à 2014[46]



46 La catégorie « vapocraquage » se réfère à la production des oléfines constitutives des plastiques (éthylène, propylène, benzène, etc.) par vapocraquage.

Le captage et le stockage d'émissions biogéniques (émissions négatives BECCS) représente 5,4 $MtCO_2$ dans l'industrie. Il intervient principalement sur la combustion de gaz réseau, dont une part est biogénique.

- **Captage et valorisation du CO_2**. La valorisation du CO_2 est mobilisée pour la production de méthanol dans l'industrie chimique, à hauteur de 731 $ktCO_2$ par an en 2050. Le captage de CO_2 valorisé est essentiellement d'origine biogénique (unités de méthanisation, bioraffineries), afin de décarboner les produits obtenus.

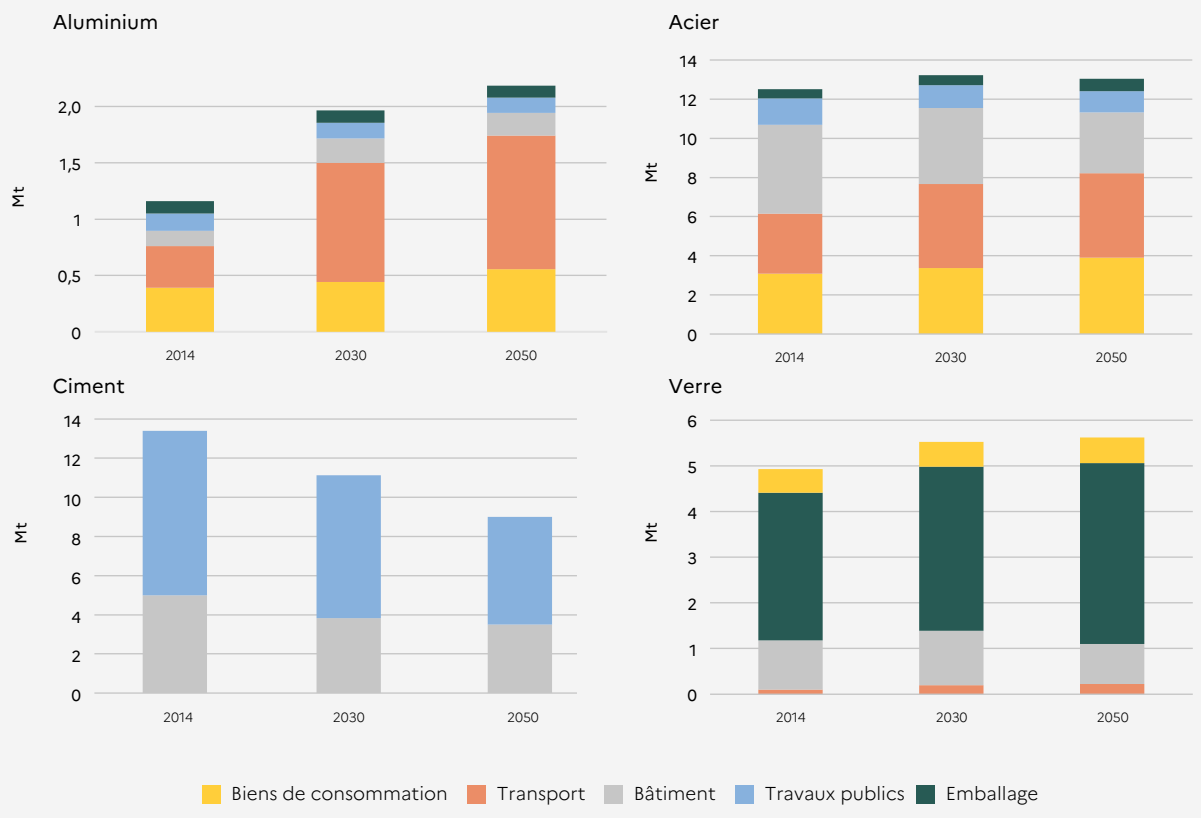
Trajectoires : illustration de points de passage en 2030

Les évolutions de la production industrielle *(Graphique 19)* sont fortement liées aux évolutions de la demande des secteurs des transports (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), du bâtiment (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) et des emballages (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*). En particulier :

- **la demande en aluminium** suit la production de véhicules et fait l'objet d'une forte croissance (+ 69 %) entre 2014 et 2030, qui ralentit ensuite (+ 11 % entre 2030 et 2050) ;
- **la demande en ciment** suit l'évolution des constructions neuves et se réduit assez linéairement entre 2014 et 2050 ;
- **la demande en verre** progresse de 18 % entre 2014 et 2030 mais se réduit ensuite (- 14 % entre 2030 et 2050) avec le développement de la réutilisation des emballages.

Par ailleurs, les industries se mobilisent autour d'un pari technologique sur le CCS. Dès 2030, la plupart des secteurs industriels mettent en place une première unité de captage de large échelle, pour un total d'émissions captées de 10,6 $MtCO_2$. Les émissions captées sont transportées, soit pour un stockage en mer du Nord, soit en France sur les premiers sites démonstrateurs de stockage dans les zones identifiées (Bassin parisien, Bassin aquitain...).

Graphique 19 Trajectoires d'évolution de la demande en aluminium, acier, ciment et verre par secteur consommateur dans S4



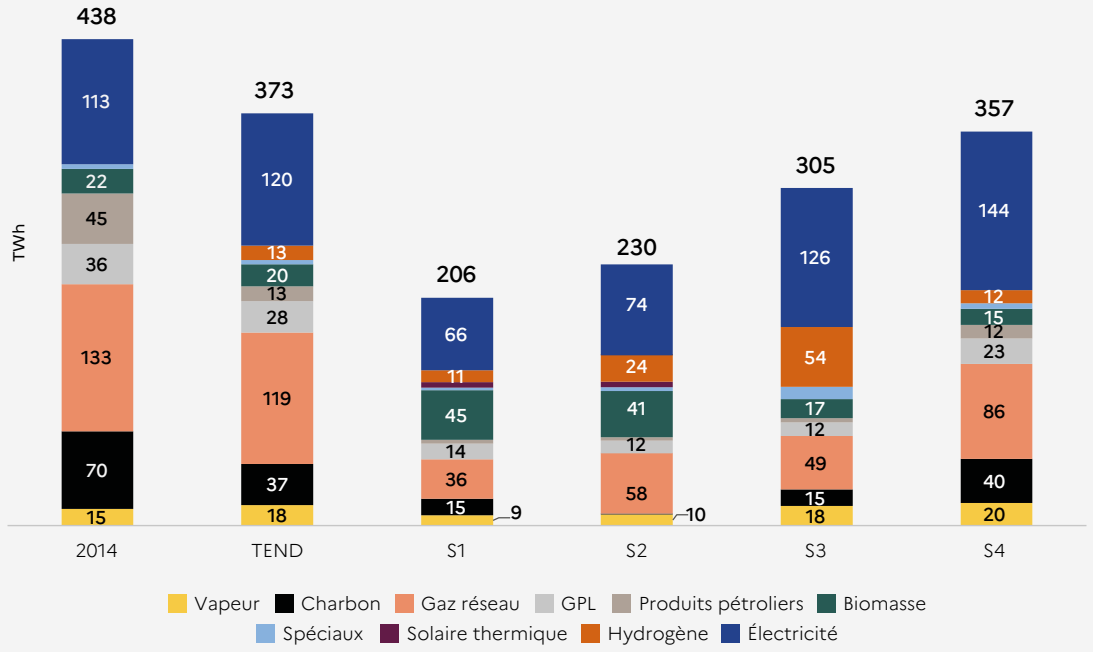
5.6. Comparaison des principaux résultats des scénarios

Les consommations énergétiques se réduisent dans tous les scénarios (*Graphique 20* et *Graphique 21*) et traduisent les différentes approches suivies :

- une recherche de **sobriété énergétique** dans S1 et S2, où les consommations sont réduites de près de 50 % ;
- une **décarbonation du mix énergétique** dans S3, stimulée par le fort développement des consommations industrielles d'hydrogène (plus que quadruplées par rapport au scénario tendanciel afin de produire des oléfines à partir de méthanol), l'électrification qui gagne 15 points dans le mix énergétique et la décarbonation du gaz réseau, permettant un recul limité (- 30 %) des consommations énergétiques ;
- un **captage du CO_2** dans le scénario 4, compensant les impacts de consommations énergétiques proches du scénario tendanciel et du maintien de l'utilisation de charbon, à hauteur de 57 % du niveau de 2014.

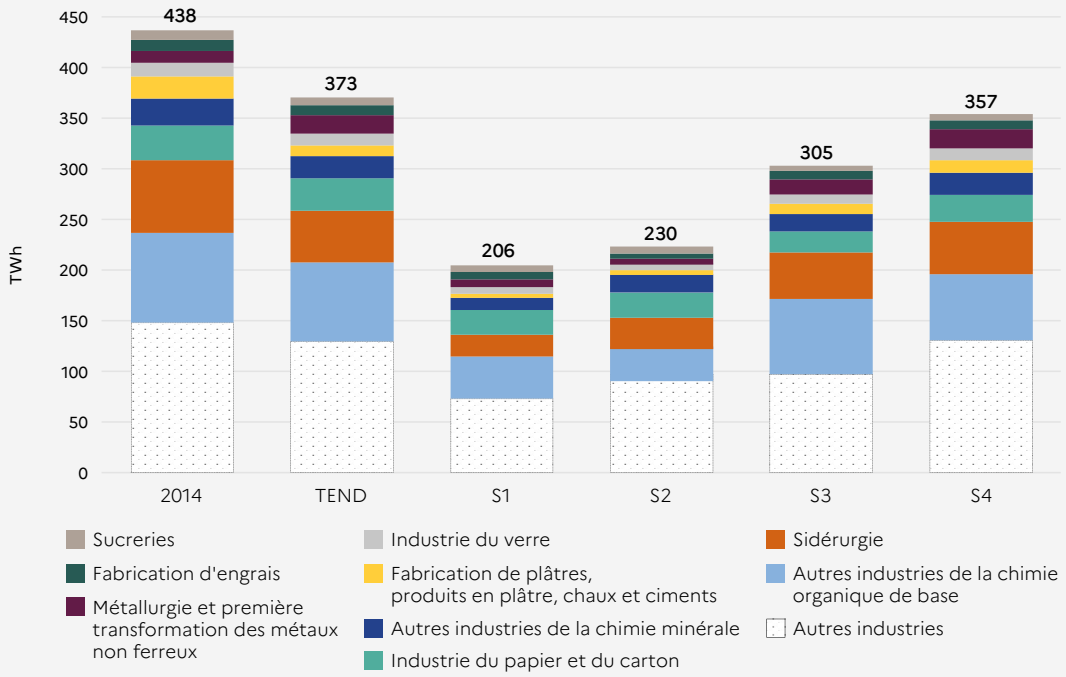
Dans l'ensemble, l'évolution du mix énergétique des scénarios montre un net recul de la consommation industrielle de charbon (- 10 points en moyenne[47]), de gaz (- 10 points) et de produits pétroliers (- 8 points) au profit de l'électricité (+ 11 points), de l'hydrogène (+ 9 points) et, en S1 et S2, de la biomasse (+ 17 points et + 13 points, respectivement).

Graphique 20 Comparaison de la consommation d'énergie totale en 2050, par scénario, incluant les usages énergétiques et non énergétiques[48]



47 Moyenne hors scénario tendanciel.
48 La catégorie « spéciaux » se réfère aux combustibles spéciaux de la nomenclature du CEREN et de l'EACI : déchets industriels (pneus usagés, peintures, solvants, etc.), charbon de bois, boues d'épuration, farines animales, déchets végétaux agroalimentaires…

Graphique 21 Répartition des consommations d'énergie (dont matières premières) en 2014 et en 2050, par scénario et par type d'industrie (IGCE et autres)



Les baisses de consommations énergétiques proviennent particulièrement des secteurs de la chimie organique et de la sidérurgie, en lien avec l'arrêt de l'utilisation de plastiques à usage unique et le recul de l'activité du BTP *(Graphique 21)*.

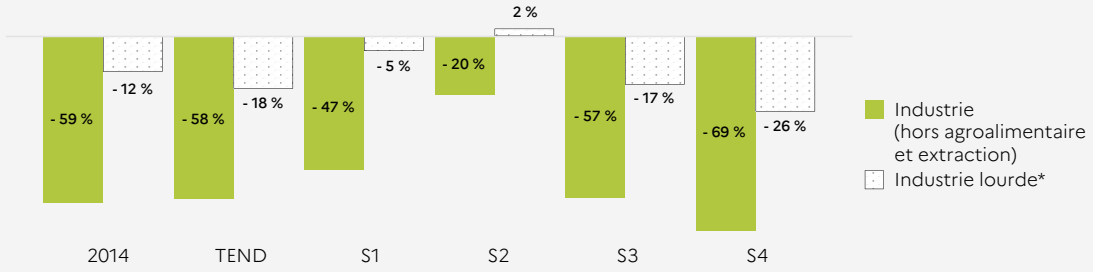
- Les évolutions de la sidérurgie se répercutent surtout sur la consommation de charbon, quasi stoppée dans S2 dans lequel la production d'acier par hauts fourneaux est arrêtée.
- Les consommations d'énergie du secteur du ciment sont également fortement réduites, y compris dans le scénario tendanciel (- 51%) en raison de la mise en application des réglementations actuelles dans le secteur du bâtiment.
- À l'inverse, les consommations du secteur des métaux non ferreux progressent dans S3 et S4, en lien avec la croissance du besoin en aluminium pour la construction de véhicules.

Dans les industries non énergo-intensives, les consommations énergétiques reculent également en suivant, à un rythme souvent légèrement moindre, les évolutions de l'industrie lourde.

En outre, l'intensité des échanges internationaux varie selon les scénarios et impacte donc les niveaux de consommation énergétique (*cf. section 5*, encadré *Commerce international*). À titre d'exemple, la relocalisation des activités est plus importante dans S1 que dans S2, les consommations énergétiques issues de la relocalisation y sont donc plus significatives *(Graphique 22)*.

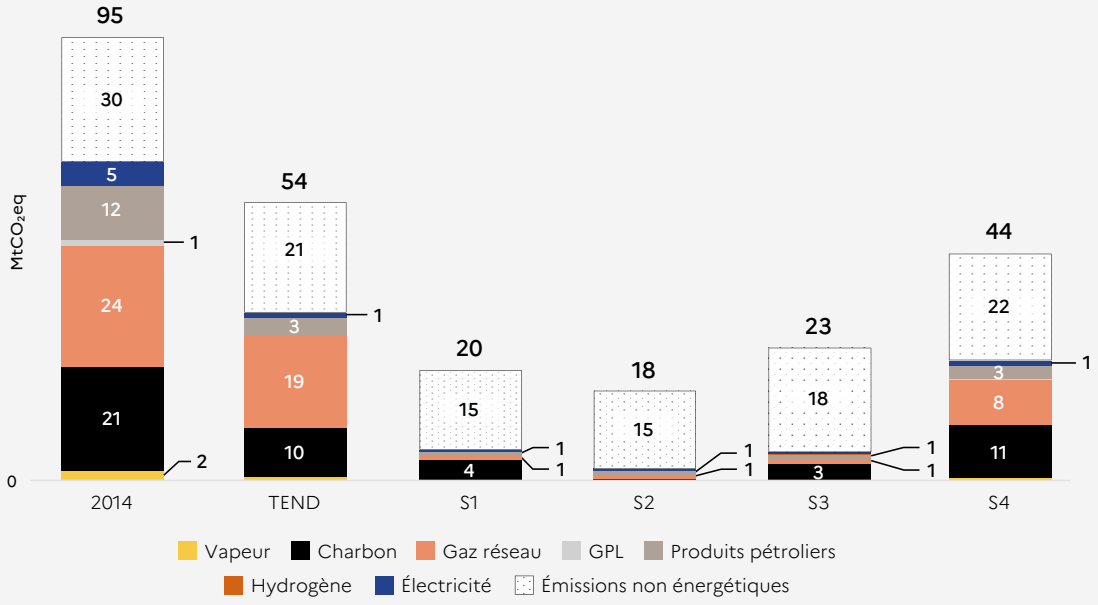
Les scénarios proposés par cette prospective aboutissent à quatre objectifs différenciés de réduction de GES pour l'industrie (*Graphique 23* et *Graphique 24*). L'objectif de réduction de - 81% sur l'industrie porté par la SNBC n'a ainsi pas constitué un élément de cadrage du présent exercice, ce dernier ayant pour objectif d'enrichir les discussions autour de sa mise en œuvre.

Graphique 22 *Taux S/P moyens dans les secteurs industriels considérés en 2014 et 2050, par scénario*[49]

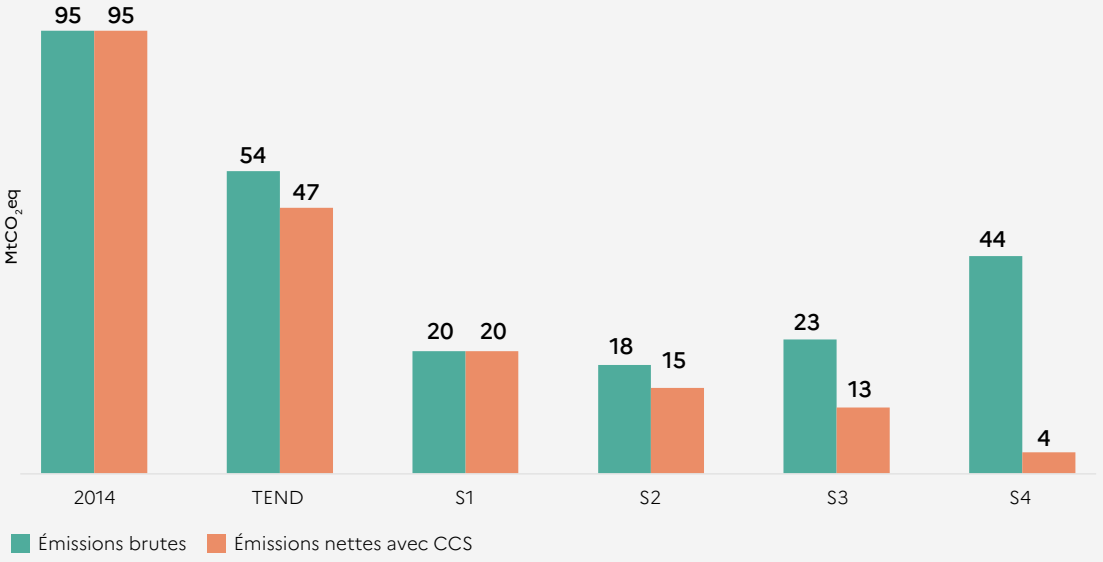


* Industrie lourde (hors sucre) : acier plat, acier long, aluminium, ciment, verre, ammoniac, dichlore, oléfines, papier-carton.

Graphique 23 *Comparaison des émissions de GES (hors CCS) en 2014 et en 2050, par scénario et selon leur origine*



Graphique 24 *Comparaison des émissions de GES brutes (hors CCS) et nettes (CCS inclus) en 2014 et en 2050, par scénario*



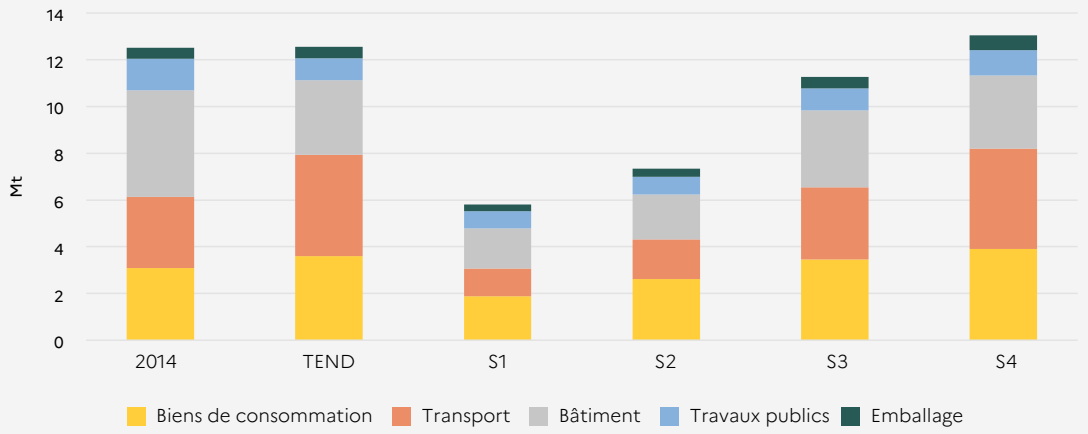
49 Les valeurs présentées jusqu'ici et dans l'encadré *Commerce international* en *section 5* apportaient une vision des soldes commerciaux en volume physique, adaptée à l'industrie lourde : elles correspondaient à une moyenne des taux S/P spécifiques à chaque matériau, pondérée par les volumes de production associés. Ce graphique apporte un autre éclairage, présentant l'ensemble de l'industrie (hors agroalimentaire et extraction) en comparaison avec l'industrie lourde (IGCE). Les valeurs indiquées correspondent, cette fois, à une moyenne non pondérée des taux S/P sur les secteurs considérés.

FOCUS SUR LA SIDÉRURGIE

Hypothèses et résultats

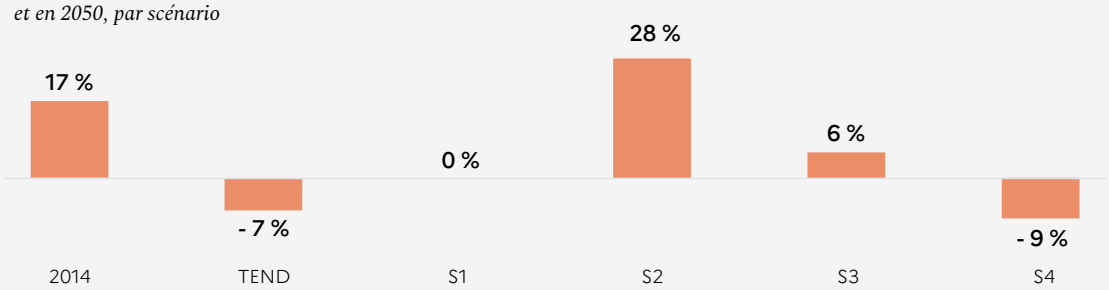
- **Demande**. La demande en acier est principalement liée aux évolutions des secteurs du bâtiment (nombre de constructions neuves, *cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) et des transports (nombre de ventes de véhicules, aluminium utilisé en substitution à l'acier, *cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*). Un fort recul de la demande est pris en compte dans S1 et S2, tandis qu'elle reste quasi stable dans S3 et S4 *(Graphique 25)*.

Graphique 25 Demande d'acier par secteur consommateur en 2014 et en 2050, par scénario



- **Commerce international.** Les échanges commerciaux de l'acier montrent qu'un basculement s'est opéré après 2014, avec un solde qui est devenu importateur, en raison de la baisse importante des exportations *(Graphique 26)*. Cette dynamique se poursuit dans S4, où le développement des échanges internationaux renforce les importations, notamment d'aciers longs[50]. En revanche, la filière devient fortement exportatrice dans S2, bénéficiant des efforts de réindustrialisation et de la qualification d'un acier français bas carbone. Similairement, le passage à une production d'acier à partir d'hydrogène dans S3 permet d'envisager un rebond sensible des exportations. Enfin, dans S1, les dynamiques protectionnistes débouchent sur un solde commercial nul, en volume physique.

Graphique 26 Solde commercial importateur de l'acier en pourcentage du volume de production (-S/P) en 2014 et en 2050, par scénario



Suite page suivante

50 Les aciers longs constituent aujourd'hui 30 % de la production française d'acier et sont principalement issus de la filière électrique (voir plus bas). Correspondant aux barres, profilés (rails de chemin de fer, poutrelles) et produits tréfilés, ils sont en particulier utilisés dans la construction (béton armé). Les aciers plats constituent 70 % de la production française d'acier et sont principalement issus de la filière haut fourneau. Ils correspondent aux tôles fortes (utilisées pour la réalisation de gros tubes soudés, la construction navale, le bâtiment, les ouvrages d'art et la chaudronnerie) et minces (construction automobile, emballage, électroménager, couverture et bardage de bâtiments).

FOCUS SUR LA SIDÉRURGIE

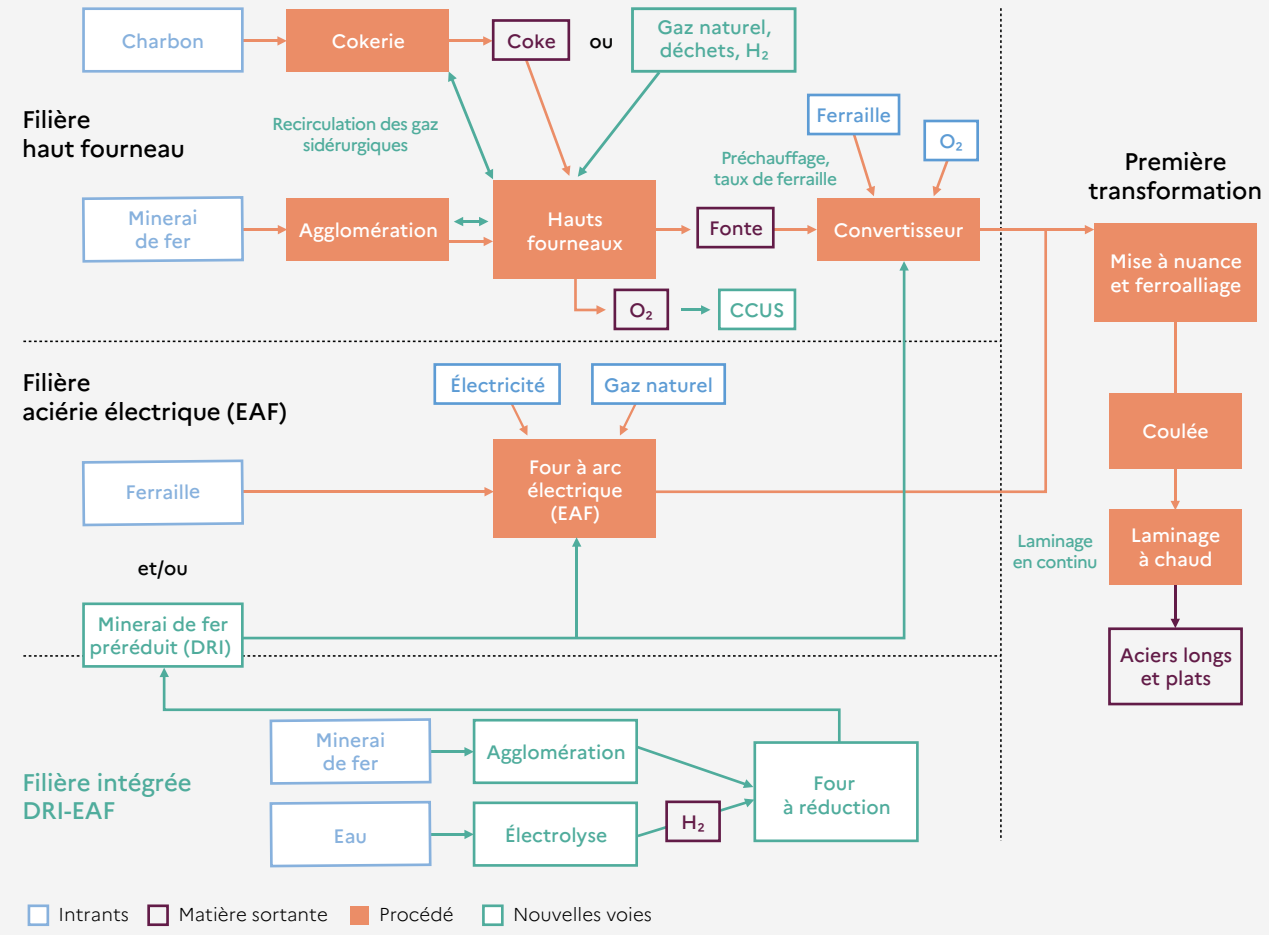
Sous l'effet de ces évolutions, la production française d'acier se réduit, très fortement dans S1 (- 62 % par rapport à 2014), et de façon plus limitée dans les autres scénarios (- 33 % en S2 ; - 21 % en S3 et S4).

- Système productif. L'acier est un alliage métallique composé de fer et d'une part de carbone, auxquels sont adjoints des éléments d'addition (manganèse, chrome, nickel…). La production d'acier se partage aujourd'hui entre deux filières : une **filière primaire**, dans laquelle le minerai de fer est désoxydé (réduit) et fondu en présence de coke dans les hauts fourneaux, et une **filière secondaire**, dans laquelle de la ferraille de récupération est fondue dans les aciéries électriques.

  Une nouvelle filière primaire, basée sur l'usage de minerai de fer préréduit, est considérée dans S2 et S3 (filière DRI-EAF). Le minerai de fer préréduit, ou plus communément appelé DRI (*Direct Reduced Iron*), est produit par réduction directe de minerai de fer. La production de DRI se fait actuellement essentiellement sur des procédés de reformage du gaz naturel. Le DRI peut être utilisé en sidérurgie en complément ou en remplacement de ferrailles dans un four à arc électrique classique, ou dans un convertisseur à oxygène (filière haut fourneau). La filière intégrée DRI-EAF désigne la production et la fusion du DRI par un four à arc électrique sur un même site. Aujourd'hui encore au stade de R&D, **la filière intégrée DRI-EAF** suscite beaucoup d'intérêts car elle offre une solution potentielle pour produire de l'acier bas carbone avec l'utilisation d'électricité décarbonée et d'hydrogène à la place de gaz naturel ou de charbon.

La production d'acier constitue 23 % des émissions de GES de l'industrie, dont 90% proviennent, à l'heure actuelle, de la filière haut fourneau. Plusieurs améliorations sont présagées pour réduire l'impact carbone de la production d'acier *(Figure 5)*.

Figure 5 Voies de production de l'acier

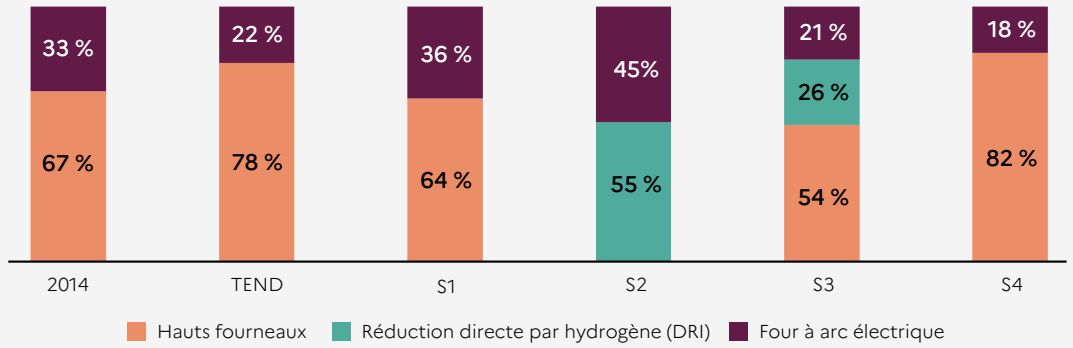


Suite page suivante

FOCUS SUR LA SIDÉRURGIE

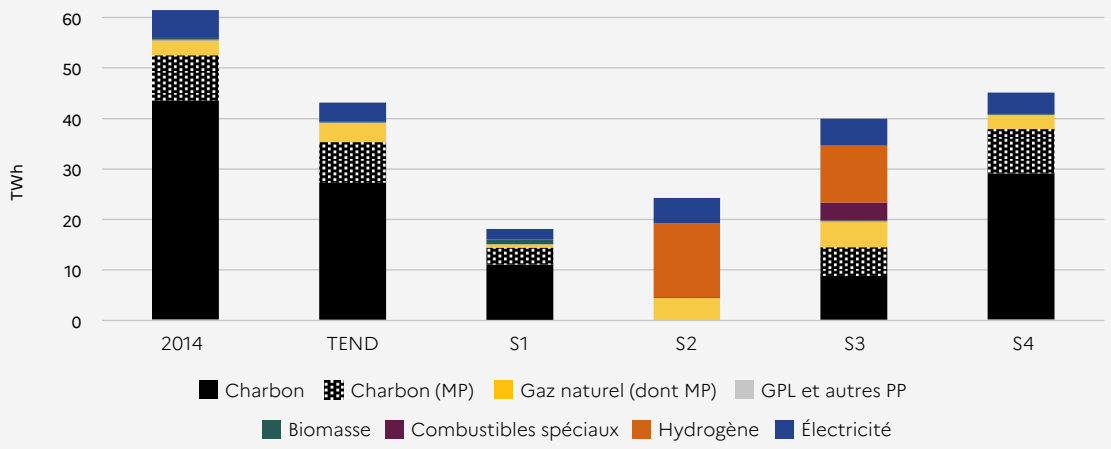
Dans S2, le développement du recours à de la ferraille de qualité permet aux fours à arc électrique d'augmenter leur part de marché de 12 points, en parallèle du **remplacement des hauts fourneaux par une nouvelle filière de réduction directe (DRI-EAF)**. Inversement, dans S3 et S4, les hauts fourneaux dominent toujours la production d'acier en France, grâce au déploiement de l'hydrogène dans S3 (injection d'hydrogène et de déchets plastiques en tant qu'agents réducteurs dans le haut fourneau), et au CCS dans S4.

Graphique 27 Répartition des filières de production d'acier en 2014 et en 2050, par scénario



- **Consommations énergétiques**. En conséquence de ces évolutions de filières de production et des perspectives de marché, les consommations énergétiques de la sidérurgie varient fortement d'un scénario à un autre *(Graphique 28)*. En l'occurrence, environ deux fois plus d'énergie est requise dans S3 et S4 par rapport à S1. Résultat d'itinéraires technologiques très variés et notamment de la place du vecteur hydrogène, le mix énergétique est également sensiblement différent entre S2 et S3 d'une part, et S1 et S4 d'autre part.

Graphique 28 Consommation d'énergie finale (dont matières premières) de la production d'acier en 2014 et en 2050, par scénario

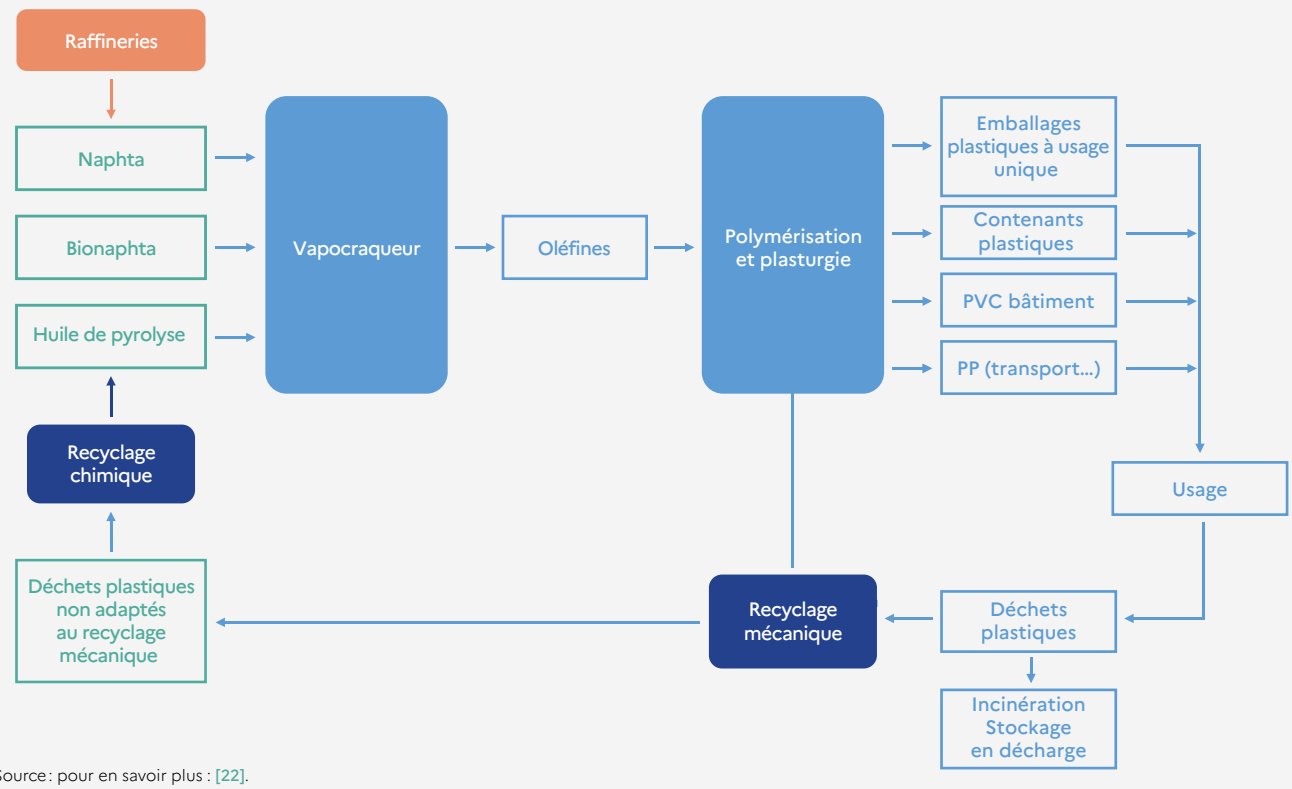


FOCUS SUR LA CHIMIE DES PLASTIQUES

Un secteur particulièrement complexe à modéliser

À l'heure actuelle, les oléfines (éthylène, propylène, benzène, etc.), nécessaires à la fabrication des plastiques, sont produites à partir de naphta, coproduit dans les raffineries à partir de pétrole *(Figure 6)*. Actuellement, le naphta consommé en France est importé ou produit sur le territoire national. Par ailleurs, une part est également exportée, rendant le solde commercial français positif. Ce naphta est craqué dans un vapocraqueur pour produire ces principales oléfines. Les six vapocraqueurs présents sur le territoire français émettent plus de 5 $MtCO_2$/an, soit plus du quart des émissions totales du secteur de la chimie, qui représente lui-même un quart des émissions de l'industrie.

Figure 6 Voies de production et de recyclage des plastiques



Source : pour en savoir plus : [22].

En complément de la réduction de la consommation de plastique, plusieurs voies de production alternatives des oléfines ont été modélisées dans le cadre de cet exercice prospectif :

- **deux intrants alternatifs dans les vapocraqueurs en substitution totale ou partielle au naphta** : (pour l'ensemble des scénarios) et déchets de plastiques pyrolysés[51] (uniquement dans S4). Le bionaphta est produit par les bioraffineries (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). Ces substituts demeurant insuffisants pour combler les besoins en intrants matières des vapocraqueurs. Ils sont complétés par du naphta. Ce dernier est essentiellement importé en raison de la fermeture des raffineries françaises d'ici 2050 (hormis une raffinerie conservée dans S1, *cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*) ;
- **deux filières de production alternatives innovantes** : *bioethanol-to-olefins* (S1, S3 et S4, en fonction de la disponibilité de bioéthanol) et *methanol-to-olefins* (S3) produit à partir d'hydrogène et de CO_2 (CCU).

Suite page suivante

51 La technologie de recyclage chimique des déchets pyrolysés a été envisagée pour S3 et S4. Elle n'a cependant été exploitée que dans S4, les autres ressources (bionaphta) s'avérant suffisantes pour couvrir la demande en oléfines dans S3.

FOCUS SUR LA CHIMIE DES PLASTIQUES

Tableau 3 Chiffres clés de la production d'oléfines en 2050, par scénario

	TEND	S1	S2	S3	S4
Répartition des intrants matières dans le vapocraqueur					
Naphta	93 %	87 %	42 %	-	35 %
Bionaphta	7 %	13 %	58 %	100 %	57 %
Plastiques pyrolysés	-	-	-	-	8 %
Part des filières de production des oléfines					
Vapocraqueurs	100 %	98 %	100 %	61 %	99 %
Bioethanol-to-olefins	-	2 %	-	7 %	1 %
Methanol-to-olefins (CCU et H_2)	-	-	-	32 %	-
Quantité produites par filières de production de méthanol [Mt]					
Methanol-to-olefins	-	-	-	1,66	-
Méthanol hors usages oléfines	0,96	0,90	0,83	0,94	0,93

Par ailleurs, la modélisation de la production de méthanol visant d'autres usages que la production d'oléfines, en particulier la fabrication des biocarburants, formaldéhydes, etc., celle-ci a fait l'objet d'une modélisation distincte. Ces usages sont actuellement couverts quasi uniquement par de l'importation (plus de 600 000 tonnes/an). Selon les scénarios, une part de cette production est relocalisée.

Quel que soit son usage, la fabrication du méthanol est réalisée à partir d'hydrogène, produit à partir de gaz (*via* SMR) dans S1 et S4 ou par électrolyse dans S2 et S3 (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*).

Ce travail a permis de mettre en lumière l'interdépendance systémique entre l'industrie chimique et les filières de recyclage du plastique, ainsi qu'avec les raffineries et bioraffineries. En particulier :

- la fin des carburants fossiles remettrait en question le maintien des raffineries et donc la disponibilité en naphta, ce qui lie intimement la transition énergétique de la filière chimie et des plastiques à celle du secteur des transports ;
- des tensions potentielles sont à anticiper sur la ressource en déchets plastiques et donc des répercussions sur son coût d'approvisionnement.

6. Des restructurations majeures s'avèrent inéluctables pour l'industrie

Les éclairages apportés par ces différentes scénarisations d'une évolution du secteur industriel dans un objectif national de neutralité carbone nous conduisent aux enseignements suivants.

Le tissu industriel va devoir subir un changement de structure **d'envergure** car une majorité des produits et matériaux qu'il met sur le marché va voir leur demande impactée significativement à la baisse. En effet, qu'elle soit dictée par la sobriété des consommateurs ou par un accès de plus en plus contraint aux ressources matières et énergétiques, la **baisse inéluctable de la demande et donc de la production industrielle** engendrera des évolutions profondes du tissu industriel français. Ces baisses de production en volume physique peuvent toutefois ne pas impacter pleinement la valeur ajoutée, grâce à la fabrication à plus haute valeur ajoutée dans l'industrie manufacturière et au consentement à payer des consommateurs pour des produits plus durables. Enfin, toute évolution du secteur industriel constitue une source d'inquiétudes, qu'elle soit liée à l'emploi ou à la délocalisation, qui nécessitera des politiques publiques adaptées aux différents produits.

Les secteurs industriels ne seront pas « tous égaux » face à ces bouleversements, mais tous vont devoir repenser leur stratégie vers de **nouveaux modèles économiques « compatibles avec la neutralité carbone »** : moins de volume, plus de valeur ajoutée, de services, de réparabilité des produits…

Concernant les activités industrielles les plus émettrices ou énergo-intensives, elles devront faire face à un **mur d'investissement** à la fois dans des **technologies matures** mais aussi dans la recherche et développement pour développer des **innovations de rupture**. Les tensions sur un mix énergétique décarboné pour l'ensemble des usages sont telles que toute amélioration de la performance énergétique ou carbone des procédés industriels doit être étudiée.

Par ailleurs, l'enjeu capitalistique est tel que se pose la question des priorités de production au niveau national et au niveau local. Cette réflexion est forcément associée aux enjeux de résilience et d'autonomie et à la place que l'on souhaite donner au commerce international et à notre balance commerciale dans cette évolution. Cette proposition de **« nouvelle révolution industrielle bas carbone »** devra être comprise, construite et acceptée par l'ensemble de la société civile : entrepreneurs, citoyens, salariés, corps intermédiaires et au plus près des territoires, pour que cette adhésion permette les changements nécessaires d'activités des entrepreneurs et des salariés en cohérence avec l'évolution des actions et postures des consommateurs privés ou publics.

Quel que soit le bouquet de déterminants qui dessineront l'avenir du secteur industriel, à l'instar de ceux modélisés dans les quatre scénarios présentés, les actions suivantes doivent être poursuivies ou engagées dès à présent.

DES CONDITIONS OPTIMALES DE DÉVELOPPEMENT D'UNE INDUSTRIE BAS CARBONE AU SERVICE D'UNE SOCIÉTÉ DÉCARBONÉE

1. Une politique d'aménagement du territoire adossée à ces enjeux de développement d'une industrie bas carbone, en y intégrant les spécialisations territoriales relatives au mix énergétique disponible, aux infrastructures les plus adaptées en matière de logistique, réseaux H_2, CO_2 et aux autres mutualisations possibles entre acteurs industriels de proximité dans une logique d'EIT et plus globalement d'économie circulaire plus locale.

2. Le rôle actif de l'État et des collectivités, pour donner visibilité et confiance aux industriels pour de nouveaux marchés en produits bas carbone. Le rôle des marchés publics favorisant le « made in France bas carbone » est ainsi primordial et doit pouvoir se compléter par des dispositifs de type « Carbon Contracts for Difference » mis en place au niveau européen.

3. L'accompagnement à la transformation des métiers pour une industrie bas carbone, en formation continue ou initiale, qui doit permettre aussi de redonner de l'attractivité et du sens à ces emplois souvent délaissés. L'adaptabilité entre secteurs pour tenir compte des changements de structuration du tissu industriel sera particulièrement recherchée, en particulier pour accompagner le développement d'activités industrielles autour des EnR, de l'H_2, du recyclage, de la réparation… et plus particulièrement dans les zones dépendantes d'activités à forte probabilité de baisse de la production industrielle actuelle.

4. La poursuite d'accompagnements publics incitatifs (aide d'État au déploiement ou à l'innovation) ou plus coercitifs (renforcement du prix du carbone), dans la durée, pour engager les acteurs industriels dans la modernisation bas carbone de leur outil industriel ou la recherche de nouvelles technologies, tout en priorisant ce soutien vers les activités industrielles compatibles avec la trajectoire bas carbone attendue pour le pays.

DES ENGAGEMENTS SUR LE LONG TERME POUR LES INDUSTRIELS QUI S'EMPARENT DE CES OPPORTUNITÉS

1. La définition de stratégies bas carbone ambitieuses, notamment pour les groupes industriels énergo-intensifs ou fortement émetteurs, dans la continuité des feuilles de route de décarbonation des principales filières industrielles représentées par leurs différents Comités Stratégiques de Filière. Une évaluation de la cohérence et l'ambition de leur stratégie bas carbone avec la méthodologie ACT, notamment pour bénéficier d'une vision internationale pour ces acteurs qui ont très souvent des implantations à l'étranger, devrait servir de base de discussion avec les pouvoirs publics.

2. Le conditionnement de l'ensemble des soutiens publics à l'industrie au développement d'installations industrielles bas carbone ou à la réalisation des premières installations en France dans le cadre de l'aide à l'innovation. Pour cela, une trajectoire ambitieuse et fiable dans la durée du prix du carbone doit être assurée. En effet, la visibilité sur le long terme des conditions économiques et fiscales liées à l'énergie et au carbone est un élément clé pour permettre des arbitrages d'investissements aussi capitalistiques que le nécessite la décarbonation de l'outil industriel. Une remise à plat de la fiscalité sur les énergies fossiles et les énergies renouvelables ou décarbonées doit être engagée, tout en analysant la spécificité des matières fossiles non substituables utilisées par certains acteurs industriels.

DES ÉVOLUTIONS RAPIDES DU CADRE NORMATIF OU RÈGLEMENTAIRE À L'ÉCHELLE INTERNATIONALE POUR TENIR COMPTE DES ENJEUX DE COMPÉTITION INTERNATIONALE

1. L'alignement des règles du commerce international sur les enjeux du changement climatique et de la raréfaction des ressources, permettant à des initiatives comme le MACF (mécanisme d'ajustement carbone aux frontières européennes) de trouver leur pertinence en complément du durcissement de la Directive EU-ETS (SEQE-UE) et de son adaptation aux nouveaux enjeux (CCUS par exemple).

2. La normalisation rapide des nouveaux produits ou matériaux bas carbone (ex. : béton bas carbone…) permettant des commercialisations plus rapides, ainsi que l'intégration de nouvelles technologies ou produits dans différents cadres normatifs, notamment les directives européennes (CCU dans la directive RED sur les équipements radioélectriques…).

L'ensemble de ces mesures n'atteindront leur pleine efficacité qu'en corollaire **d'un nouveau « contrat sociétal » pour définir et partager les avantages et les limites d'une industrie bas carbone au service de la société neutre en carbone envisagée pour 2050.**

7. Des hypothèses à affiner en concertation avec les différents secteurs

La mobilisation des différents outils et la modélisation de chacun des scénarios ont progressivement mis en lumière certaines limites inhérentes à l'exercice de prospective, notamment pour l'industrie, et donc potentiellement des pistes de développement pour de futurs travaux.

- Le caractère systémique de cet exercice a nécessairement amené des contraintes dans l'établissement des itinéraires de réductions des consommations énergétiques des différents secteurs industriels, du fait des nombreuses itérations avec les trajectoires des autres secteurs. À titre d'exemple, le recours à davantage d'électrification dans l'industrie renvoie à un arbitrage indispensable sur l'usage de l'électricité eu égard aux autres besoins comme dans les transports. De même, les niveaux de production de certains matériaux comme l'acier et le clinker (ciment) dépendent fortement, voire exclusivement pour le second, de l'activité estimée du BTP et donc des hypothèses sur les modes de déplacement, les façons de travailler, de se loger et de s'alimenter. **Ainsi, le champ des possibles s'avère très vaste lors du cadrage de ces hypothèses, mais très contraignant lors de leurs répercussions sur les niveaux d'activités de certains secteurs industriels.**

- En termes de modélisation, le prisme de la consommation d'énergie choisi pour cet exercice conditionne :

  1. le périmètre de l'industrie sélectionné : **le degré de finesse de la modélisation et donc de l'analyse est plus important pour les Industries Grandes Consommatrices d'Énergie que pour le reste de l'industrie, considérée comme plus « diffuse »**. Un prisme socio-économique aurait par exemple permis d'affiner l'analyse sur le secteur du textile, celui de la production automobile ou encore celui de l'aéronautique. Les secteurs IGCE font également l'objet de travaux plus poussés dans le cadre des Plans de Transition Sectoriels (PTS) réalisés par l'ADEME. Les secteurs de l'acier, de l'aluminium, du ciment et de la chimie ont ainsi pu être plus approfondis en raison de l'état d'avancement de ces travaux, par rapport aux secteurs papiers/cartons, sucre et verre dont les travaux PTS devraient démarrer en 2022 ;

  2. les indicateurs considérés : la méthodologie considérée implique de ne prendre en compte initialement que les consommations d'énergie dans la définition des choix technologiques, des évolutions du commerce international, etc. Ce panorama énergétique n'est enrichi qu'*a posteriori* par des considérations sur les émissions directes de GES, ainsi que sur les empreintes carbone et matière.

- Sur le plan des technologies :

  1. une appréciation différente du contexte économique et de l'environnement incitatif peut conduire à reconsidérer les potentiels maximaux d'efficacité énergétique et d'électrification atteignables dans chacun des scénarios ;

  2. la quantification des émissions réellement évitées par la valorisation du CO_2 reste à perfectionner (*cf. section 2*, encadré *Captage, stockage et valorisation du CO_2*).

- Au niveau du commerce international, une modélisation plus fine des échanges de produits et sous-produits par secteur aurait permis de refléter l'intensité des échanges et l'hétérogénéité des comportements des partenaires commerciaux (*i.e.* pays de l'Union européenne *vs* pays hors de l'Union européenne) avec plus de précision. En effet, l'indicateur du commerce international ne prend en compte qu'un solde commercial en mettant uniquement en lumière la position d'importateur ou d'exportateur net du secteur industriel.

Plus précisément, pour chaque scénario, plusieurs perspectives d'améliorations ainsi que d'autres hypothèses de scénarisation sont envisageables :

SCÉNARIO 1

- Pour aller plus loin : afin d'affiner les enseignements autour de ce scénario, il aurait été intéressant de quantifier davantage les impacts de l'évolution de la demande sur l'industrie aval.

- **D'autres hypothèses pour répondre à cet univers prospectif S1** : il aurait pu aussi être envisagé de considérer des niveaux de relocalisation plus ambitieux, notamment sur l'industrie aval afin de diminuer notre dépendance aux importations. Cette approche aurait nécessité une vision sectorielle très fine, notamment pour en déterminer les impacts en termes d'augmentations de consommations d'énergie et de ressources. Une première macro-estimation donne néanmoins un surplus de consommation de l'ordre de 28 TWh, soit 14 % de la consommation « industrie » du S1.

SCÉNARIO 2

- **Pour aller plus loin** : afin d'affiner les enseignements autour de ce scénario, différentes évolutions ou répercussions pourraient être investiguées, par exemple :
  - si ce scénario est le plus ambitieux en matière d'efficacité énergétique, le potentiel maximal identifié pourrait être revu à la hausse en considérant des innovations de rupture soutenues par les stratégies d'accélération publiques ;
  - une estimation plus fine des gisements de matières premières de recyclage permettrait de gagner en robustesse sur ce scénario.

- **D'autres hypothèses pour répondre à cet univers prospectif S2** : il aurait pu aussi être envisagé le développement de l'hydrogène combustion, sous réserve des arbitrages dans la modélisation des systèmes électriques et gaz.

SCÉNARIO 3

- **Pour aller plus loin** : afin d'affiner les enseignements autour de ce scénario, différentes évolutions ou répercussions pourraient être investiguées, par exemple :
  - si ce scénario est le plus ambitieux en matière d'électrification, le potentiel maximal identifié pourrait être revu à la hausse en considérant des innovations de rupture soutenues par les stratégies d'accélération publiques ;
  - un arbitrage plus fin des importations et donc des productions par une scénarisation des partenariats commerciaux selon leur empreinte carbone et énergétique.

- **D'autres hypothèses pour répondre à cet univers prospectif S3** : une réindustrialisation à l'échelle européenne, basée sur le développement de complémentarités et d'échanges équilibrés entre les industries des pays membres, aurait pu être considérée. En conséquence, des améliorations ciblées des soldes commerciaux français auraient pu être modélisées, à l'image de S1 ou S2. La sécurisation des marchés européens, le dégagement d'avantages comparatifs favorables aux produits bas carbone de l'UE et le développement de mécanismes européens de soutien aux industries pourraient alors, en complément, favoriser des niveaux d'investissement plus élevés pour les technologies d'efficacité énergétique et matière.

SCÉNARIO 4

- **Pour aller plus loin** : afin d'affiner les enseignements autour de ce scénario, il s'agira de creuser :
  - dans quelles mesures les hypothèses prises, tant technologiques qu'économiques, sont réalistes au regard du corps social ;
  - l'évaluation des contraintes sur les ressources (eau, sols, matériaux).

- **D'autres hypothèses pour répondre à cet univers prospectif S4** : le choix technologique du CCS comme solution principale et définitive de décarbonation de l'industrie ne permet pas, dans ce scénario d'envisager le CCS comme solution transitoire en attendant l'émergence de nouvelles solutions plus pérennes au-delà de 2050. Cette hypothèse serait à analyser au regard d'études plus complètes sur les dynamiques de stockage à l'échelle européenne ou méditerranéenne.

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **INSEE**, « Les entreprises en France », 2019 (https://www.insee.fr/fr/statistiques/4255733).

[2] **CITEPA**, « Rapport Secten », 2020.

[3] **Deloitte et UNIDEN**, « Le redéploiement industriel, un enjeu social, économique et un instrument de maîtrise de notre empreinte carbone », 2021 (https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/fr/Documents/sustainability-services/deloitte_uniden_redeploiement-industriel-2021%20lite.pdf).

[4] **CEREN**, « Bilan des consommations d'énergie de l'industrie en 2016 », 2019.

[5] **ADEME**, « Les Chiffres Clés Entreprises 2016 », 2016 (https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/2409-entreprises-chiffres-cles-9791029705243.html).

[6] **BRGM et ministère de la Transition écologique**, « Registre national des Émissions Polluantes (IREP) », 2018 (http://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/installations-industrielles-rejetant-des-polluants).

[7] **C. Rossi**, *Carte des plus gros émetteurs directs de CO_2 (non biomasse) en 2019* (https://www.data.gouv.fr/fr/reuses/les-plus-gros-emetteurs-directs-de-co2-en-2019/).

[8] **ADEME**, « Plan de Transition Sectoriel de l'industrie cimentière en France : premiers résultats technico-économiques – Rapport de synthèse », 2021 (https://finance-climact.fr/wp-content/uploads/2021/03/Synthese_PTS_03-02-21_QuadriModifiee_BD.pdf).

[9] **ADEME**, « Mémo d'analyse des enjeux de décarbonation du secteur Ciment », 2021 (https://finance-climact.fr/wp-content/uploads/2021/06/memo-pts-ciment-2021.pdf).

[10] **I Care & Consult**, « Actualisation de l'étude gisement des certificats d'économie d'énergie 2021-2030 », 2020 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3640-actualisation-de-l-etude-gisement-des-certificats-d-economie-d-energie-2021-2030.html).

[11] **ADEME**, « La chaleur fatale », 2017 (https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chaleur_fatale-8821-2018-06_pdf).

[12] **ADEME**, *Chiffres clés Climat, air, énergie*, 2018 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/1725-climat-air-et-energie-9791029712005.html).

[13] **CEREN**, « Première analyse du potentiel technique d'électrification des procédés industriels thermiques par des technologies matures », 2020.

[14] **ADEME**, « Valorisation du CO_2. Quels Bénéfices ? Sous quelles conditions ? », 2021 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4975-valorisation-du-co2-quels-benefices-sous-quelles-conditions-.html).

[15] **ADEME**, « Captage et stockage géologique de CO_2 (CSC) en France », 2020 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/81-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france.html).

[16] **SDES**, *Les facteurs d'évolution des émissions de CO_2 liées à l'énergie en France de 1990 à 2018*, 2020 (https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-facteurs-devolution-des-emissions-de-co2-liees-lenergie-en-france-de-1990-2018).

[17] **Club CO_2**, « Position Paper », 2021 (à paraître).

[18] **Ember**, « Carbon Price Viewer », *Ember* (https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/).

[19] **ADEME**, Institut négaWatt, ENERTECH et Solagro, « Transition industrielle – Prospective énergie matière : vers un outil de modélisation des niveaux de production », 2020 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/340-transition-industrielle-prospective-energie-matiere-vers-un-outil-de-modelisation-des-niveaux-de-production.html).

[20] **ALLICE**, « Potentiel d'électrification des procédés thermiques industriels », 2021 (à paraître).

[21] **CITEPA**, « CCNUCC – Le rapport d'inventaire officiel dans le cadre de la Convention Climat », 2019 (https://www.citepa.org/wp-content/uploads/CCNUCC_2020_TablesCRF.zip).

[22] **ADEME**, « Mémo d'analyse des enjeux de décarbonation du secteur Chimie », 2021 (https://finance-climact.fr/wp-content/uploads/2021/06/memo-pts-chimie-2021.pdf).

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2014	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
BÂTIMENT – nombre de constructions neuves en 2050 (maisons individuelles et logements collectifs)	338 820	178 846	1 420	68 832	261 917	179 678
BÂTIMENT – surface moyenne des maisons individuelles neuves [m²]	114	113	80	100	113	113
TRANSPORTS – nombre de véhicules particuliers neufs à 2050 [Millions]	1,92	2,48	1,08	1,36	1,91	2,31
TRANSPORTS – part de l'aluminium dans la masse totale hors batterie d'un véhicule particulier [%]	8,9	12,80	12,80	12,80	12,80	12,80
TRANSPORTS – rythme de construction de toutes infrastructures routières à 2050 [km/an]	9 231	3 563	414	714	3 681	7 020
AGRICULTURE – évolution en 2050 par rapport à 2014 de la consommation d'engrais azotés par habitant [%]	-	- 25	- 71	- 91	- 69	- 68
PAPIER – évolution en 2050 par rapport à 2014 de la consommation de papiers graphiques par habitant [%]	-	- 35	-	-	- 35	- 50
EMBALLAGES SOBRIÉTÉ – évolution de la consommation de sacs plastiques à 2050 par rapport à 2014 [%]	-	- 100	- 100	- 100	- 100	- 100
RECYCLAGE – taux de matières premières recyclées dans la production de plastique (PET) [%]	5	50	80	90	50	50
COMMERCE INTERNATIONAL – taux S/P (*i.e.* (exportations - importations)/production, en tonnes) des produits longs en acier [%]	2	- 32	-	-	- 32	- 50
COMMERCE INTERNATIONAL – taux S/P (*i.e.* (exportations - importations)/production, en tonnes) du secteur de l'aluminium [%]	- 38	- 38	-	-	- 38	- 56
FILIÈRES PRODUCTION – part de la filière hauts fourneaux dans la production d'acier à 2050 [%]	67	78	64	-	54	82
FILIÈRES PRODUCTION – part de la filière *methanol-to-olefins* dans la production d'oléfines à 2050 [%]	-	-	-	-	32	-
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE – COP froid (2014 : 3)	3	3,14	3,39	3,64	3,39	3,14
ÉLECTRIFICATION – part des combustibles remplacés par de l'électricité sur le gisement de combustibles fossiles substituables de 2014 dans les chaudières fonctionnant 24h/24 (3 x 8) [%]	-	15	15	15	100	58
ÉLECTRIFICATION – COP PAC séchage (2014 : 3,5)	3	3,6	3,6	3,6	4	3,8
MIX ÉNERGÉTIQUE – part du charbon dans les hauts fourneaux à 2050 [%]	96	96	96	Plus de HF	47	96
MIX ÉNERGÉTIQUE – part du bois dans le mix énergétique des chaudières à 2050 [%]	17	23	100	87	33	23
INTRANTS MATIÈRE – part de naphta dans les vapocraqueurs [%]	100	93	87	42	-	35
INTRANTS MATIÈRE – part de plastiques pyrolysés dans les vapocraqueurs [%]	-	-	-	-	-	8

03

PRODUCTION D'ÉNERGIE

374 Mix gaz

407 Froid et chaleur réseaux et hors réseaux

447 Biomasse énergie

474 Carburants liquides

512 Hydrogène

03 PRODUCTION D'ÉNERGIE

1. Mix gaz

1. Synthèse de la problématique et des enjeux pour le secteur
375

2. Rétrospective des tendances et état actuel
378

3. Description de la méthode de quantification des scénarios
380

4. Stratégies pour le secteur, selon chaque scénario
384

5. Comparaison des scénarios
397

6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures
399

7. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs
402

8. Références bibliographiques
405

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur
406

1. Synthèse de la problématique et des enjeux pour le secteur

1.1. Importance de la transformation du secteur

Le gaz représentait 14 % de la consommation d'énergie primaire en France en 2015 (425 TWh_{PCI}, données corrigées des variations climatiques), principalement pour le résidentiel, le tertiaire, l'industrie et la production d'électricité [1]. Ce gaz est en quasi-totalité d'origine fossile et importé. Sa combustion a émis la même année 17 % des émissions totales de gaz à effet de serre de la France (80 $MtCO_2eq$) [2]. Outre sa combustion, sa production et son transport sont également à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 17 $MtCO_2eq$[1]. Dans l'objectif de neutralité carbone en 2050, l'enjeu est à la fois le développement du gaz d'origine renouvelable et la diminution de la consommation de gaz, en particulier d'origine fossile. Cette augmentation de la production de gaz renouvelable sur le territoire national permettra en outre d'améliorer la balance commerciale de la France et de renforcer son indépendance énergétique (*cf. section 2.2*).

1.2. Enjeux de la substitution du gaz fossile

Il existe principalement trois filières de production de gaz renouvelable.

La **méthanisation** consiste à produire un mélange de gaz appelé biogaz, composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone, par digestion anaérobie de matières organiques fermentescibles : effluents d'élevage, résidus de cultures, boues de stations d'épuration des eaux usées, déchets des industries agroalimentaires… Le biogaz peut être utilisé directement comme combustible ou pour produire de l'électricité dans des installations de cogénération. Transformé en biométhane après épuration, il présente une composition et des propriétés thermodynamiques équivalentes à celles du gaz naturel et peut être injecté dans les réseaux de gaz ou conditionné en bioGNV comme carburant pour véhicules. La méthanisation est une technologie mature, en fort développement en France avec 1 018 installations au 1er janvier 2021 (+ 21 % en un an). La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) fixe un objectif de 7 à 10 % de la consommation de gaz en 2028 satisfaite par du biogaz (soit 22 à 29 TWh_{PCI}). Ces objectifs devraient être atteints sans trop de difficulté puisque la capacité des projets de méthanisation en file d'attente à fin décembre 2020 dépasse la cible inférieure de la PPE (*cf. section 2.2*).

La **pyrogazéification** consiste à produire un gaz de synthèse appelé syngas par traitement thermochimique de matières organiques non fermentescibles (biomasse lignocellulosique sèche : bois, bois déchets, pailles…) ou de déchets carbonés non recyclables, notamment des combustibles solides de récupération (CSR). Le gaz produit est composé principalement d'hydrogène, de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure, de méthane et de diazote. Comme le biogaz, le syngas peut être utilisé directement pour la production de chaleur ou d'électricité ou être injecté dans le réseau après conversion en méthane par méthanation et épuration. La **gazéification hydrothermale** est également un procédé thermochimique à haute pression et haute température mais qui nécessite en intrants de la biomasse humide ou liquide : digestats de méthanisation, effluents et résidus liquides industriels, boues de stations d'épuration d'eaux usées… Ces deux technologies sont encore en développement. Leur niveau de maturité (*technology readiness level*, ou TRL, noté sur une échelle allant de 0 à 9) est variable selon les intrants et les procédés de valorisation envisagés. Le TRL de la pyrogazéification pour la production de méthane est estimé à 7 par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) [3] mais certains projets ont atteint un TRL 8 (en particulier la plateforme GAYA d'ENGIE en France). Plusieurs installations pilotes et démonstrateurs existent déjà ou sont en projet en France et dans le monde et permettront de tester le potentiel d'industrialisation de la filière. La gazéification hydrothermale, quant à elle, est moins mature.

Le ***power-to-gas*** consiste à convertir de l'électricité en hydrogène par électrolyse de l'eau. L'hydrogène peut être utilisé directement pour des usages énergétiques ou comme matière première ou peut être converti en méthane par méthanation, après ajout

1 Calculé d'après le facteur d'émission amont du gaz naturel du réseau en France en 2015 (Base Carbone®), issu de l'étude « Analyse du cycle de vie de la chaîne gazière » – GRT gaz, TIGF, STORENGY, GRDF, ELENGY de 2018. Les émissions de méthane provenant des infrastructures gazières représentent 2 % des émissions de méthane en France [2].

de CO_2 : on parle alors de ***power-to-methane***. Si l'électricité est d'origine renouvelable, le gaz produit (H_2 ou CH_4) l'est également. Les technologies d'électrolyse et de méthanation sont en cours de maturation (TRL 9 pour l'électrolyse basse température alcaline et PEM et TRL 7 pour la méthanation catalytique et biologique [4]) et font l'objet de plusieurs projets visant à tester leur potentiel technique et économique (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*).

Les filières de pyrogazéification et de méthanation, bien que non matures aujourd'hui, pourraient représenter un levier important de production de gaz renouvelable au-delà de 2030. Pour cela, il faut que les investissements en R&D et dans les démonstrateurs se poursuivent sur ces deux filières afin de lever les derniers **verrous techniques/économiques** et que le cadre règlementaire leur soit favorable.

Les différents procédés de production de gaz renouvelable comme la méthanisation et la pyrogazéification permettent **une production de méthane prévisible et constante tout au long de l'année**. Les caractéristiques du méthane permettent d'utiliser d'une part les infrastructures de gaz naturel déjà en place, notamment les réseaux de transport et de distribution qui desservent une grande partie du territoire, et d'autre part les infrastructures de stockage dont la capacité représente environ 120 TWh_{PCI}. Ces filières sont donc adaptées aux demandes thermosensibles caractéristiques du vecteur (*cf. section 2.1*) qui impliquent de recourir au gaz stocké en période de pointe.

Les filières de production de gaz renouvelable devront également trouver un **modèle économique**. En effet, elles présentent un coût de production élevé par rapport à celui du gaz naturel, y compris en tenant compte de l'effet d'échelle associé aux progrès techniques et au développement des filières. Ainsi, le prix moyen du gaz naturel en 2019 sur le marché européen a été d'environ 22 EUR/MWh_{PCI}, ce qui revient à 31 EUR/MWh_{PCI} avec la composante carbone (45 EUR/t CO_2) et il est estimé entre 17 et 28 EUR/MWh_{PCI} en 2040 [5]. Le coût actuel du biométhane en France est de 100 à 110 EUR/MWh_{PCI} [6] et la PPE fixe un objectif de coût du biométhane de 83 EUR/MWh_{PCI} en 2023 et 67 EUR/MWh_{PCI} en 2028. Le coût de production du méthane par pyrogazéification à partir de biomasse est évalué entre 90 et 130 EUR/MWh_{PCI} et celui du *power-to-methane* est estimé entre 115 et 205 EUR/MWh_{PCI}, en fonction des coûts d'approvisionnement en électricité [7]. La rentabilité de ces filières par rapport au gaz fossile dépendra donc du soutien public dont elles bénéficieront sous forme de tarifs d'achat, abattement du coût de raccordement au réseau, droit à l'injection, aides aux agriculteurs, etc. Elle dépendra également des autres formes de soutien comme les certificats de production de biogaz et du niveau de prix fixé pour le carbone (*cf. section 6.2*).

Par ailleurs, la production de méthane par méthanisation et par pyrogazéification est limitée par le **potentiel de biomasse mobilisable** pour ces usages (*cf. section 3.2*). En effet, ce gisement dépend fortement des usages des sols et des systèmes agricoles présents, ainsi que des autres voies de valorisation de la biomasse (alimentation, matériau, combustion, biocarburants). Par ailleurs, cet usage de la biomasse se doit d'intégrer des enjeux de préservation de la biodiversité et des puits carbone (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). Le potentiel de développement de la ressource biomasse est également impacté par le changement climatique et par la disponibilité future des ressources en eau, qui affecteront les rendements et pourront accroître la tension sur l'usage de ces gisements. Quant au *power-to-methane*, il requiert de l'électricité renouvelable et/ou décarbonée et entre donc en concurrence avec les autres demandes en électricité et en hydrogène.

Au-delà des aspects techniques et économiques, la perception des projets de méthanisation par les riverains peut poser des problèmes d'appropriation car la filière est encore peu connue du grand public : crainte des risques de fuites voire d'explosion ou d'incendie, nuisances olfactives et sonores…

A contrario, les nombreuses **externalités positives** de la méthanisation et de la pyrogazéification pourraient favoriser leur insertion dans les territoires et leur développement : réduction des émissions de GES de l'agriculture et des élevages ; valorisation de déchets organiques de l'élevage, des industries et des collectivités ; moindre recours à des engrais minéraux en partie remplacés par des digestats ; meilleure indépendance énergétique des agriculteurs ; préservation de la biodiversité et stockage du carbone dans les sols grâce aux cultures intermédiaires et aux biodéchets ; relocalisation des activités ; création d'emplois directs et indirects en particulier dans des territoires ruraux ; complément de revenus pour les agriculteurs ; réduction du déficit de la balance commerciale lié aux importations de gaz naturel… La Commission de régulation de l'énergie (CRE) estime que la prise en compte de ces externalités pourrait assurer la compétitivité du biométhane par rapport au gaz naturel à partir d'un coût de production entre 80 et 110 EUR/MWh_{PCI} [6].

Au-delà des technologies de production de gaz renouvelable, dont le potentiel est physiquement limité, la réduction des impacts GES du gaz doit également s'envisager *via* le levier du **captage et du stockage de carbone** (*carbon capture and storage* [CCS]). Cette technologie pourrait en particulier permettre la décarbonation de grandes unités industrielles consommatrices de gaz fossile (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

1.3. Enjeux de l'évolution de la demande en gaz

Comme cela a été présenté plus haut, le potentiel de développement du gaz renouvelable est physiquement limité par les volumes de biomasse et d'électricité requis. Par ailleurs, son coût de production est actuellement plus élevé que celui du gaz naturel. Par conséquent, atteindre la neutralité carbone nécessite de **réduire les consommations globales de gaz**. Pour chaque secteur consommateur de gaz, les différents leviers de cette baisse de la consommation doivent être considérés : sobriété, rénovation, amélioration des équipements, substitution par d'autres vecteurs, après priorisation des **usages du gaz non substituables** (*cf.* *section 3.3*).

Ainsi, dans **l'industrie** (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*), certains procédés peuvent être électrifiés sans nécessiter d'investissement dans des transformations majeures (par exemple : substitution de chaudières à gaz par des pompes à chaleur). En revanche, lorsque des adaptations plus intrusives sont nécessaires (changement de flux ou remplacement des infrastructures au cœur du procédé susceptibles d'impacter l'équilibre économique de l'industrie, sa logistique ou les choix de production), l'électrification est plus délicate à mettre en place. De plus, la qualité et la nature d'un procédé peuvent être affectées par son électrification. Par exemple, les aciéries électriques ne produisent pas aujourd'hui le même type d'acier que les hauts fourneaux. Dans certains cas, le maintien du vecteur gaz peut ainsi s'avérer pertinent.

Dans le secteur du **bâtiment** (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*), qui représente aujourd'hui la moitié de la consommation de gaz, les contraintes sur le potentiel de développement du gaz renouvelable et sur son coût de production laissent penser que la place du gaz pourrait diminuer de manière importante, notamment au profit de l'électricité (en particulier les pompes à chaleur), du bois énergie et des réseaux de chaleur. Dans le neuf en particulier, le gaz est amené à disparaître sous l'influence de la réglementation environnementale RE2020.

À l'inverse, ce vecteur pourrait jouer un rôle grandissant dans les **transports** (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), conjointement avec l'hydrogène, en particulier pour le transport lourd et longue distance, un des secteurs les plus difficiles à décarboner.

Enfin, dans un système où la demande en électricité pourrait être plus importante qu'aujourd'hui avec une forte pénétration des énergies renouvelables électriques variables, le gaz pourrait jouer un rôle clé pour assurer **la sécurité de l'approvisionnement du système énergétique**, en particulier en pointe hivernale. Ses capacités de stockage représentent en effet environ 120 TWh_{PCI}, soit le quart de la consommation actuelle de gaz [8]. Cette flexibilité pourrait être apportée par la production d'électricité dans des centrales à gaz, qui peuvent permettre un soutien du réseau à l'échelle horaire, hebdomadaire ou saisonnière, contrairement à d'autres technologies comme les batteries ou les centrales de pompage-turbinage (STEP), qui ont des capacités de stockage plus limitées. D'autres technologies comme les pompes à chaleur hybrides dans les bâtiments[2] pourraient également participer à cette flexibilité du système énergétique. À l'inverse, dans les situations où la production d'électricité renouvelable serait excédentaire par rapport à la consommation, le *power-to-gas/methane* pourrait permettre de valoriser cette électricité en la stockant pour diverses échelles temporelles, y compris le long terme.

2 La pompe à chaleur hybride est une pompe à chaleur électrique de petite puissance couplée à une chaudière gaz qui prend le relai de la pompe à chaleur en période de grand froid.

2. Rétrospective des tendances et état actuel

2.1. Demande en gaz

La consommation totale de gaz naturel en France, corrigée des variations climatiques, était de 295 TWh_{PCI} en 1990 [1]. Elle a ensuite connu une forte croissance pendant une dizaine d'années pour atteindre des niveaux proches de 450 TWh_{PCI} au début des années 2000, soit une hausse de 50 %. Cette croissance a été notamment portée par le secteur du bâtiment (+ 60 TWh_{PCI} en 12 ans) et par celui de la production d'électricité (+ 50 TWh_{PCI}). Ces deux évolutions ont accompagné la baisse du fioul dans le logement et celle du charbon dans la production d'électricité, permettant ainsi de réduire les émissions de CO_2 associées à ces usages, le gaz fossile étant relativement moins carboné que le fioul et le charbon. Depuis le début des années 2000, la consommation de gaz est stable.

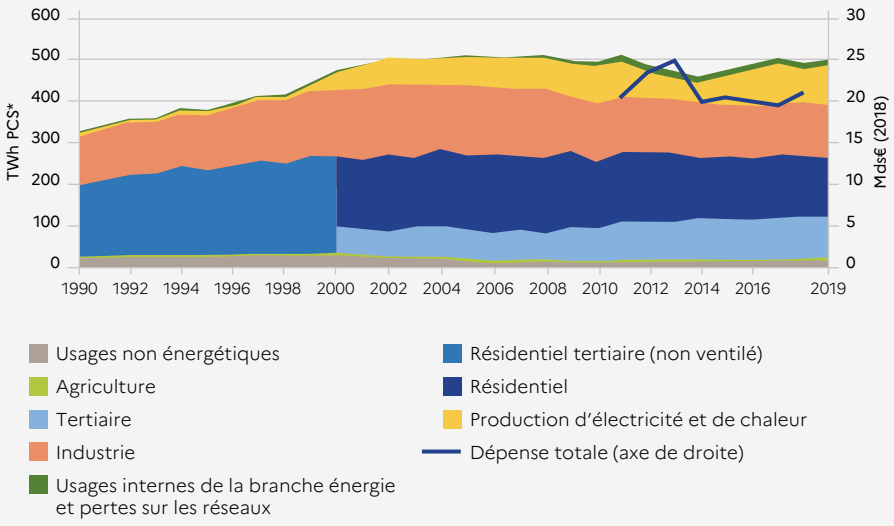
En 2015, le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) a représenté la moitié de la consommation de gaz en France. L'industrie a consommé 27 % du gaz et la production d'électricité et de chaleur 13 %. Les usages pour le transport et la mobilité sont marginaux à 1 TWh, soit 0,4 % de la consommation énergétique finale des transports [9] *(Graphique 1)*. Toutefois, le GNV est en forte progression ces dernières années, de + 91 % entre début 2015 et début 2021 [10], en particulier sur le marché des véhicules lourds.

La prépondérance de l'usage chaleur du vecteur gaz rend sa consommation fortement thermosensible. Elle présente donc d'importantes fluctuations saisonnières, avec un différentiel de consommation entre la pointe hivernale et le creux estival de l'ordre d'un facteur 10, à comparer à celui de l'électricité, proche d'un facteur 3 [11].

2.2. Offre de gaz

Jusqu'en 2012, la consommation française de gaz a été entièrement assurée par du gaz naturel. Pendant plusieurs décennies, le gisement de Lacq (de 1957 à 2013) et le gaz de mine extrait du bassin du Nord-Pas-de-Calais (depuis les années 1970) ont permis une **production nationale**. En 1990, 29 TWh_{PCI} ont ainsi été produits en une année sur le territoire national (soit 10 % de la consommation). Aujourd'hui, cette production nationale de gaz naturel, entièrement assurée par les mines des Hauts-de-France amenées à disparaître, est **marginale** (90 GWh_{PCI} soit 0,2 % de la consommation). La France est donc quasiment entièrement dépendante des importations pour son approvisionnement en gaz.

Graphique 1 *Consommation totale (hors pertes) de gaz naturel par secteur en France de 1990 à 2019*



* Données corrigées des variations climatiques.

Source : [1].

Ces **importations de gaz naturel** ont représenté 287 TWh_{PCI} en 1990 et ont compté pour 18 % de la facture énergétique de la France (3,7 milliards d'euros constants 2019). Depuis, elles sont en augmentation quasi constante. Elles ont atteint 459 TWh_{PCI} en 2015, transit inclus (les exportations ayant représenté 57 TWh_{PCI} [9]), soit une augmentation moyenne de 3 % par an. La facture gazière a représenté alors 26 % de la facture énergétique de la France avec 10,5 milliards d'euros constants 2019. L'approvisionnement provient majoritairement d'Europe : la Norvège est depuis une vingtaine d'années le principal fournisseur de la France (48 % des importations en 2015 [1]), suivie par la Russie (13 %), les Pays-Bas (12 %), l'Algérie (9 %), le Nigeria (2 %) et le Qatar (1 %). Sept interconnexions terrestres, un point d'entrée par gazoduc depuis la mer du Nord et quatre terminaux méthaniers garantissent la sécurité d'approvisionnement. La hausse des importations s'est traduite par un doublement des capacités d'entrée par gazoduc aux frontières entre 2005 et 2015 [12].

Il existe actuellement en France **deux réseaux gaziers distincts**. Le nord de la France est majoritairement alimenté en gaz à bas pouvoir calorifique (ou gaz B), tandis que le reste de la France utilise du gaz à haut pouvoir calorifique (ou gaz H), qui représente 90 % de la consommation nationale. Le gaz B est importé en totalité des Pays-Bas. Le gisement d'origine étant en fin de vie, ces importations cesseront en 2029. Les réseaux de transport et de distribution de gaz B, ainsi que les appareils à gaz, seront donc progressivement convertis au gaz H d'ici à 2029.

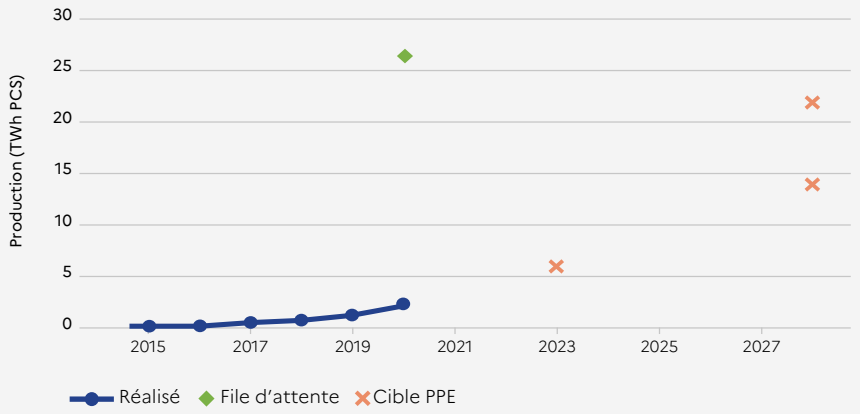
Depuis la mise en place de tarifs d'achat en 2011, du **biométhane issu de la méthanisation** est injecté dans les réseaux. Bien que cette production représente pour l'instant moins de 1 % de la consommation de gaz en 2020, la filière est en forte croissance : 1,1 TWh_{PCI} en 2019, 2 TWh_{PCI} en 2020, soit une hausse de 79 % en un an *(Graphique 2)*. Cette production a été assurée en 2020 par 214 installations d'une capacité totale de 3,5 TWh_{PCI}/an[3]. À fin décembre 2020, la capacité des 1 164 projets en file d'attente approchait 23,9 TWh_{PCI}/an[4].

L'injection de biométhane dans le réseau ne représente qu'une minorité de la valorisation des installations de méthanisation actuellement en service en France. En effet, sur un total de 1 018 installations de méthanisation en service au 1er janvier 2021, environ 65 % font de la cogénération et 20 % de la chaleur seule. Ainsi, 2,6 TWh d'électricité ont été produits en 2020 par 861 installations d'une puissance totale de 523 MW. Bien qu'en augmentation de + 12 % en un an pour la production d'électricité, la dynamique de ces filières est moins forte que celle du biométhane injecté. Enfin, la production de biométhane directement valorisée sous forme de carburant reste à ce jour marginale.

Environ 65 % des installations de méthanisation enregistrées sur la base de données SINOE® sont des unités à la ferme. Le reste se répartit entre unités centralisées[5], stations d'épuration urbaines, industries notamment agroalimentaires et celles traitant des déchets ménagers. Ces installations sont implantées sur tout le territoire, avec une moindre densité en Occitanie, Provence-Alpes-Côte d'Azur et Bourgogne-Franche-Comté.

Le mix gazier n'ayant pratiquement pas évolué en nature depuis 1990 (quasiment 100 % d'origine fossile), les émissions de CO_2 liées à la combustion de gaz sont proportionnelles à sa consommation : de 60 $MtCO_2$ en 1990 contre environ 90 $MtCO_2$ en 2019 [9].

Graphique 2 Production de biométhane en France, réalisée depuis 2015, file d'attente des projets de méthanisation à fin décembre 2020 et cibles PPE



3 Le décalage entre la capacité des projets en fin d'année et la production réelle sur l'année est liée à la date de démarrage des projets qui s'étale tout au long de l'année ainsi qu'au délai de montée en puissance des installations.
4 Ces 1 164 projets présentent une maturité hétérogène mais seuls 60 à 70 % de ces projets pourraient aboutir.
5 Ce type d'installations est le plus souvent collectif, regroupant plusieurs acteurs du territoire – agriculteurs, entreprises, collectivités – et valorisant plusieurs typologies d'intrants : déchets agricoles, effluents industriels, boues de stations d'épuration, déchets verts…

3. Description de la méthode de quantification des scénarios

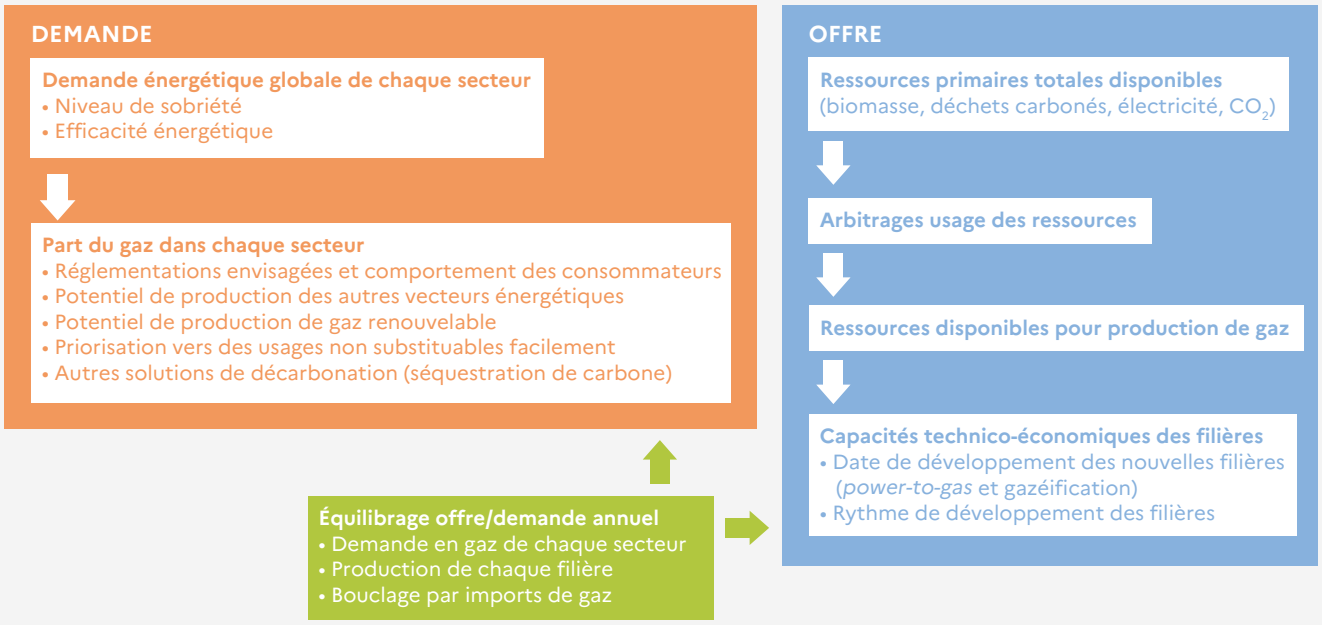
3.1. Méthode générale

La modélisation du vecteur gaz consiste en un équilibrage offre/demande à l'échelle du territoire national métropolitain à partir des déterminants physiques de la demande, au pas de temps annuel, pour chaque scénario. Les dépendances aux autres secteurs et aux autres vecteurs énergétiques ont été considérées, à la fois sur l'offre et sur la demande en gaz, afin d'assurer la cohérence du système énergétique global de chaque scénario. La cohérence des hypothèses des différents secteurs sur l'utilisation de la biomasse a également été vérifiée (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). La modélisation du réseau et des éventuelles contraintes d'acheminement ou d'injection n'a pas été réalisée, contrairement à l'étude de l'ADEME, GRDF et GRTgaz « Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ? » publiée en janvier 2018 [7].

L'équilibre offre/demande a été contrôlé en 2030 et en 2050. Ainsi, les principales étapes charnières, à la fois liées à la réglementation (PPE, LTECV) et au développement des technologies de production de gaz encore peu matures, ont pu être définies.

La méthode générale de modélisation du vecteur gaz est schématisée par la *Figure 1* et détaillée dans les paragraphes suivants. Elle a été appliquée pour chaque scénario.

Figure 1 *Méthode de modélisation du vecteur gaz*



3.2. Composition du mix gazier

Trois filières de production de gaz sont considérées : la méthanisation, la pyrogazéification couplée à la méthanation (pour injection de méthane de synthèse dans les réseaux)[6] et le *power-to-methane*.

L'injection d'hydrogène en mélange dans le réseau de gaz n'a pas été retenue (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*). Une telle injection est limitée à 20 % en volume (soit 7 % en énergie) par les prescriptions techniques des gestionnaires de réseau. Elle nécessiterait en outre d'adapter des équipements (réseau de gaz et équipements finaux), ce qui induirait des coûts incertains en partie à la charge des usagers. Cette option est donc limitée et risquée. Elle est d'autant moins intéressante que la demande en hydrogène des autres secteurs augmente et que l'hydrogène sert aussi à produire du gaz de réseau *via* le *power-to-methane*. Enfin, la question de la captation et du stockage du carbone au niveau de grandes installations consommatrices de gaz fossile est traitée spécifiquement dans le chapitre *2.2.3. Production industrielle*.

Le mix gazier a été déterminé pour chaque scénario, en cohérence avec la philosophie générale du scénario et avec les choix des secteurs en interaction avec les filières de production de gaz : agriculture, réseau électrique, hydrogène. Les trois filières de production ont été notamment analysées suivant deux critères principaux pour fixer leur niveau de production dans chacun des scénarios : les ressources primaires disponibles et leur capacité technico-économique.

RESSOURCES PRIMAIRES DISPONIBLES

Les ressources considérées pour la **méthanisation** sont majoritairement des **produits et sous-produits de l'agriculture** : cultures dédiées, cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), résidus de culture, herbe (surplus de prairies permanentes ou temporaires), effluents d'élevage. L'évaluation de ces ressources, directement issue des modélisations du système agricole, est fonction des cheptels, qui déterminent les effluents d'élevage, les cultures fourragères et les besoins en litière ; des surfaces agricoles, pour les cultures dédiées, les cultures intermédiaires et les prairies ; des rendements de culture pour les cultures dédiées et intermédiaires (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*). Ces valeurs de rendements sont fixées de manière conservatrice, notamment en raison des incertitudes liées aux effets du changement climatique sur les cultures. Pour chaque type de substrat, des taux de mobilisation issus de la bibliographie et de l'expertise de l'ADEME sont appliqués.

Certains **biodéchets** (déchets organiques des ménages, de la restauration collective et de la distribution, certains sous-produits et effluents de l'industrie agroalimentaire) ainsi que les **boues de stations d'épuration urbaines (STEP)** sont également inclus dans le périmètre de la **méthanisation**. Les volumes de boues de STEP méthanisables en 2050 sont tirés de [13][7], ceux des herbes de bord de route et de la fraction organique des déchets ménagers proviennent de [7][8]. Pour les effluents des industries agroalimentaires, le gisement mobilisable en méthanisation du scénario tendanciel est celui qui avait été identifié dans la mise à jour 2017 du scénario énergie-climat ADEME 2030-2050 [14]. Les gisements des autres scénarios ont été alignés sur les écarts des volumes de production de ces industries par rapport au tendanciel, en cohérence avec leur récit. Par ailleurs, la méthanisation de microalgues est également intégrée à l'étude, en coproduction de biodiesel. Les volumes d'huile algale transformée par cette technologie sont issus des choix de production des carburants liquides (*cf.* chapitre *2.3.4. Carburants liquides*). Les hypothèses retenues pour cette filière reposent sur des rendements pour le biogaz issus de [15] en considérant un système de production optimisé pour les biocarburants liquides et où le biogaz provient de la méthanisation des résidus de production.

La **pyrogazéification** concerne des matières lignocellulosiques : bois et coproduits de la filière bois, pailles, déchets dont CSR. L'évaluation des ressources primaires valorisables en pyrogazéification passe par une première étape d'estimation de la ressource totale biomasse lignocellulosique et déchets carbonés non recyclables. Pour la première, les surfaces forestières sont issues des modélisations de la production sylvicole qui intègrent les effets directs du changement climatique (modification des précipitations et température) (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*). Les volumes totaux de déchets tiennent compte des niveaux de consommation de chaque scénario ainsi que des politiques générales de gestion des déchets : politiques de réduction à la source, recyclage, écoconception, prolongation de la durée de vie des produits… (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets*). Contrairement à la méthanisation, la pyrogazéification pour production de méthane est potentiellement en concurrence directe avec d'autres filières de valorisation des mêmes intrants : usages matériaux, autres usages énergétiques tels que combustion et production de carburants liquides. Concernant le bois, les problématiques de préservation de la biodiversité et des puits de carbone doivent égale-

6 Hors gazéification hydrothermale (*cf.* *section 7*).
7 L'énergie primaire des boues de STEP est de 1,8 TWh_{PCI} dans tous les scénarios.
8 L'énergie primaire des herbes de bord de route est de 1,9 TWh_{PCI} dans tous les scénarios sauf dans le scénario tendanciel où ce gisement n'est pas valorisé. Celle des ordures ménagères (biodéchets) est de 2,5 TWh_{PCI}.

ment être pris en compte. Cette articulation des usages de la biomasse est un sujet complexe, à l'interface de tous les secteurs (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). La deuxième étape de l'évaluation des ressources valorisables en pyrogazéification consiste donc à intégrer ces autres usages pour déterminer la part dédiée à la production de méthane de synthèse. La hiérarchisation des filières dépend en particulier des usages finaux. Ainsi, la pyrogazéification est pertinente pour les usages du gaz identifiés comme prioritaires (*cf. section 3.3*). En revanche, pour la production de chaleur dans le bâtiment, la combustion directe a été privilégiée par rapport à la pyrogazéification. *In fine*, la filière pyrogazéification se positionne plutôt sur la valorisation de biomasses résiduelles ou de déchets carbonés non recyclables.

Le ***power-to-methane*** est perçu comme un moyen de décarboner davantage le gaz, dans un contexte de ressources biomasse (par méthanisation et pyrogazéification) moins abondantes que l'électricité renouvelable. Les ressources nécessaires sont de l'électricité et du CO_2. Les ressources électriques disponibles pour le *power-to-methane* sont soumises aux arbitrages du système électrique, étroitement liés aux autres demandes en hydrogène, le cas échéant (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*). Quant au CO_2 biogénique, il peut provenir de l'épuration du biogaz issu de méthanisation et de pyrogazéification de biomasse ainsi que de combustion de biomasse et de bioraffineries (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*). Le CO_2 issu de l'épuration du biogaz est relativement pur et représente un approvisionnement à coût nul ou quasi nul [7]. Le *power-to-methane* est davantage limité par la demande en électricité associée que par celle en CO_2. C'est pourquoi seules les installations de méthanisation ont été retenues dans cette étude pour l'approvisionnement en CO_2. **Ainsi, quel que soit le scénario, le *power-to-methane* est envisagé systématiquement en couplage avec la méthanisation**. Ce fonctionnement permet également de profiter de synergies pour l'injection dans le réseau du méthane produit par méthanisation et par *power-to-methane*.

CAPACITÉS ET LIMITES TECHNICO-ÉCONOMIQUES

La **méthanisation** est une filière mature et en fort développement ces dernières années (*cf. section 2.2*). Elle est donc mobilisable dès aujourd'hui sur le plan technique. Sur le plan économique, son développement sera fonction des avancées permettant une baisse des coûts de production ainsi que des futurs mécanismes de soutien, en raison du coût de production de méthane élevé par rapport à celui du gaz naturel (*cf. section 6.2*).

La **pyrogazéification** n'existe pas à l'échelle industrielle aujourd'hui et la France compte peu de projets en développement. Des verrous technologiques et économiques restent à lever, en particulier sur des intrants de type bois B[9] et CSR. Par ailleurs, comme la méthanisation, elle présente actuellement des coûts de production du méthane élevés par rapport à celui du gaz naturel. Un développement progressif à partir de 2026-2028 semble raisonnable.

Certaines technologies du ***power-to-methane*** n'ont pas non plus encore atteint une pleine maturité technologique, notamment celles relatives à la méthanation. Plusieurs projets d'innovation sont actuellement en cours. Leur avancement a conduit à retenir le début du développement du *power-to-methane* en 2028 dans les modélisations. À partir de cette date, la filière étant conçue en couplage avec celle de la méthanisation, le rythme de développement du *power-to-methane* suit celui de la méthanisation. En ce qui concerne les coûts de production du méthane, ils sont dépendants des coûts d'approvisionnement en électricité et en CO_2 et des coûts de transformation (électrolyse et méthanation). Ils ont été estimés entre 115 et 205 EUR/MWh_{PCI} dans [7]. Cette fourchette représente l'influence des hypothèses retenues pour le prix d'achat de l'électricité et du coût d'approvisionnement en CO_2. Dans la présente étude, le CO_2 provenant de l'épuration du biogaz, son coût d'approvisionnement est considéré nul. Quant à l'électricité, les unités de *power-to-methane* sont approvisionnées par les excédents de production d'électricité renouvelables, donc à des coûts limités. Malgré ces efforts, le coût de production du méthane par *power-to-methane* restera élevé par rapport à celui du gaz naturel. Le développement de la filière est donc assujetti aux mécanismes de soutien public.

Pour chaque scénario, le niveau de production de chacune des trois filières est fixé à son maximum respectif, déterminé sur la base des ressources primaires disponibles et des capacités technico-économiques de chaque technologie dans le scénario concerné. L'éventuel complément nécessaire à l'équilibrage de la demande globale en gaz est assuré par des **importations de gaz naturel, décarboné ou renouvelable**. Les émissions liées à la combustion de gaz fossile sont compensées par les puits de carbone.

On notera que le coût du mix de gaz résulte de la modélisation et n'est pas une donnée d'entrée. Les considérations économiques sont apportées *via* les simulations macroéconomiques et la compétitivité relative des vecteurs, tenant compte notamment de la fiscalité environnementale ou d'autres dispositifs de correction de prix.

9 Le bois de classe B correspond à des bois faiblement traités, peints ou vernis. Il provient des panneaux, des bois d'ameublements, des bois de démolition.

3.3. Définition et répartition de la demande par secteur

La **demande énergétique globale** de chaque secteur consommateur (résidentiel, tertiaire, mobilité voyageurs, transport de marchandises, industrie, agriculture et énergie) est déterminée pour chacun et dans chaque scénario, par le niveau de la demande elle-même impactée par les leviers de sobriété. Par exemple : modes de déplacement, niveaux de production, rythme de rénovation des bâtiments… L'efficacité énergétique des équipements y joue également un rôle important. Le **bouquet énergétique** pour chaque secteur dépend des tendances observées actuellement, des réglementations actuelles et envisagées, du prix et du potentiel de production des énergies, ainsi que des comportements des consommateurs (*cf. section 2.1*).

Pour le gaz, sa part dans le mix énergétique global dépend en grande partie du potentiel de production de gaz renouvelable dans chaque scénario (*cf. section 3.2*), des autres solutions de décarbonation prévues (captage et stockage de carbone et puits de carbone, substitution énergétique) et de sa compétitivité technico-économique, notamment en fonction du prix du carbone. Le potentiel de production du gaz renouvelable étant limité, les usages pour lesquels le gaz est difficilement substituable sont priorisés dans les modélisations. Ces **usages prioritaires** sont le transport longue distance (poids lourds, bus et autocars en particulier) ; les industries à haute température (par exemple les fours verriers ou les hauts fourneaux) ; le gaz matière première ; les logements collectifs avec chauffage individuel déjà équipés au gaz et la production d'électricité dans les centrales pour répondre, avec l'ensemble des autres leviers, aux besoins de flexibilité du système électrique. Les volumes de gaz utilisés pour la production d'électricité sont le résultat de l'optimisation technico-économique du système électrique à l'échelle nationale, intégrant les contraintes sur l'offre de gaz.

4. Stratégies pour le secteur, selon chaque scénario

Selon les scénarios, les deux grands leviers que sont la modération de la demande et l'offre en gaz renouvelable sont plus ou moins activés. Le *Tableau 1* fait la synthèse de ces différents leviers, par secteur de la demande et par filière de production. Une ligne présente les développements plus ou moins importants des différentes solutions technologiques de séquestration de carbone, qui contribuent le cas échéant à diminuer l'impact climat du gaz naturel importé.

Il convient de noter que **tous les scénarios prévoient une baisse de la consommation de gaz** par rapport à aujourd'hui dans tous les secteurs de la demande à l'exception du transport principalement[10]. Le levier « modération de la demande », tel que présenté dans le tableau, représente donc une hausse de la consommation de GNV par rapport à la situation actuelle, plus ou moins importante suivant les scénarios.

Les contraintes sur la demande sont les plus fortes dans S1 et S2. À l'inverse, c'est **dans S3 que les efforts de production de gaz renouvelable sont les plus importants**. Le scénario 4 mise quant à lui sur les technologies de CCS, de BECCS (*bioenergy with carbon capture storage*) et de DACCS (*direct air capture carbon and storage*) ainsi que sur les importations de gaz décarboné ou renouvelable pour diminuer l'impact du gaz naturel, qui reste importé en grande quantité.

Tableau 1 Sollicitation des leviers de décarbonation du gaz dans les scénarios

		TEND	S1	S2	S3	S4
Modération de la demande	Résidentiel et tertiaire	+	++++	+++	++	+
	Mobilités	+++	++	+++	+	+
	Industrie	+	++++	++++	++++	++
	Énergie		++	+++	+	
Développement de l'offre renouvelable ou décarbonée	Méthanisation	++	+++	+++	++++	++++
	Pyrogazéification			+	+++	++
	Power-to-methane		++	++	+	
	Importations					++
Séquestration technologique du carbone (CCS + BECCS + DACCS)		+			++	++++

10 Les consommations de l'agriculture et du CCS, le cas échéant, augmentent elles aussi mais restent faibles par rapport à la consommation totale de gaz. Dans S4, la consommation de gaz de la branche énergie est également plus élevée qu'aujourd'hui.

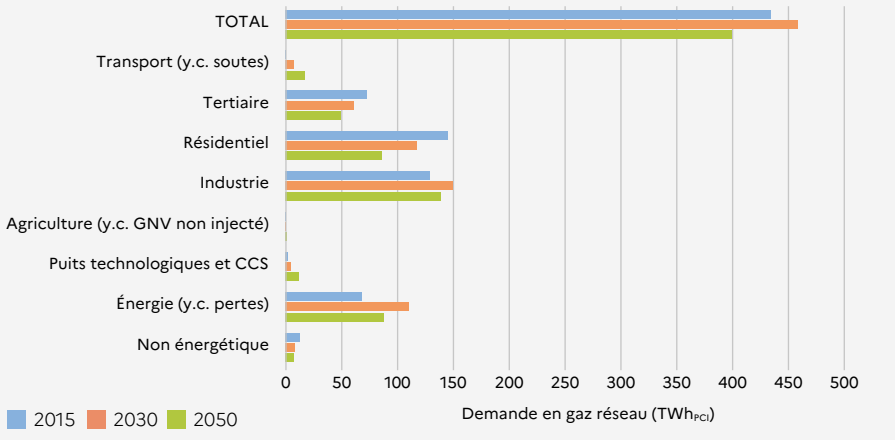
4.1. Scénario tendanciel : une décarbonation du gaz lente, uniquement *via* la méthanisation

Le scénario tendanciel prolonge sans rupture les stratégies d'adaptation des différents secteurs consommateurs observées ces dernières années ainsi que les tendances observées sur l'approvisionnement en gaz.

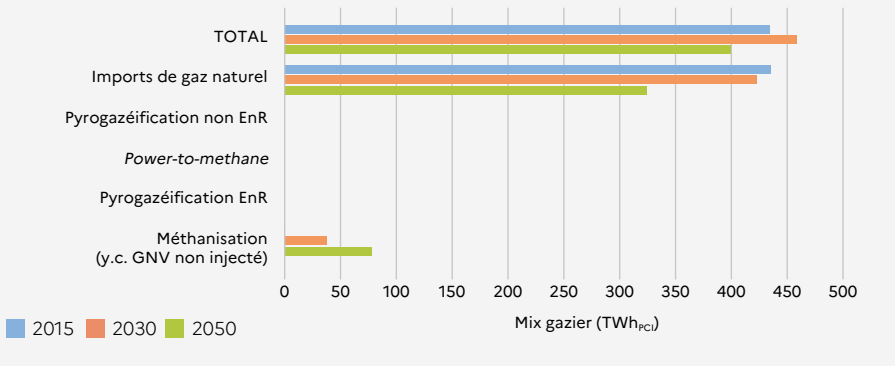
Ainsi, même si la **consommation globale de gaz** en 2050 est en légère diminution par rapport à celle de 2015 (400 TWh_{PCI}, soit - 8 % par rapport à 2015), il reste un vecteur énergétique important *(Graphique 3)*. C'est dans le résidentiel et le tertiaire que la baisse des consommations est la plus importante (respectivement - 41 % et - 32 % par rapport à 2015), en raison de l'amélioration de l'efficacité des équipements, de la rénovation énergétique des bâtiments, de la performance énergétique des bâtiments neufs ainsi que de la tendance à l'électrification. Toutefois, le gaz conserve dans ces secteurs une place importante (24 % de la consommation du résidentiel et 18 % du tertiaire en 2050). Dans le secteur des transports, il poursuit la forte progression observée ces dernières années, en particulier sur les véhicules lourds. Sa consommation est multipliée par 19 par rapport à 2015. Elle représente 4 % de la consommation totale de gaz en 2050. La consommation de gaz par l'industrie augmente légèrement par rapport à aujourd'hui (+ 8 %). Cette évolution résulte d'un équilibre entre, d'une part, une baisse importante des volumes de production, une légère amélioration de l'efficacité énergétique, une légère électrification et, d'autre part, la substitution des produits pétroliers et du charbon par du gaz de réseau. Pour la production d'électricité, les centrales à gaz compensent les centrales au charbon et au fioul qui disparaissent, aboutissant à une augmentation de la consommation de gaz de la branche énergie par rapport à 2015.

La décarbonation du gaz est lente et se fait uniquement par le biais de la méthanisation, en particulier grâce à une agriculture davantage poussée vers la production d'énergie qu'aujourd'hui *(Graphique 4)*. La filière permet d'atteindre les cibles de la PPE en 2028. Le biométhane représente 7 % de la consommation de gaz en 2030 (33 TWh_{PCI}) et 19 % en 2050 (77 TWh_{PCI}). Un rythme de développement intense, de + 2,5 TWh/an en moyenne, permet d'atteindre ces volumes. Le développement des autres filières (pyrogazéification, *power-to-methane*) est nul, faute de soutien public. **Les imports de gaz naturel fossile restent donc majoritaires dans le mix gazier**, à hauteur de 324 TWh_{PCI} en 2050.

Graphique 3 Demande en gaz dans le scénario tendanciel en 2015, 2030 et 2050



Graphique 4 Mix de gaz dans le scénario tendanciel en 2015, 2030 et 2050



La méthanisation se développe de manière importante sur les exploitations agricoles, qu'elles soient tournées vers l'élevage ou la culture. Au-delà de la production d'énergie, qui permet l'apport d'un revenu direct, la méthanisation est conçue par les agriculteurs comme un moyen d'améliorer la valorisation agronomique des effluents d'élevage. En nombre d'unités, ces installations à la ferme représentent environ les deux tiers des méthaniseurs en opération en 2050. Les autres installations sont principalement des unités collectives territoriales. Mais d'autres méthaniseurs, en plus faible proportion, viennent moderniser le traitement des déchets organiques dans les stations d'épuration des eaux usées ou sur quelques sites d'industries agroalimentaires.

Les **formes de valorisation de la méthanisation** évoluent radicalement par rapport à aujourd'hui. La cogénération, majoritaire depuis les débuts de la filière, devient très largement minoritaire en 2050 en termes d'énergie produite. En outre, en raison des besoins importants en gaz renouvelable, les projets d'injection de biométhane sont davantage soutenus. L'injection de biométhane dans le réseau, en injection directe ou en injection portée, est l'option prioritaire retenue, sur tous les types d'installations. En 2050, toutes les unités centralisées et les trois quarts des unités de méthanisation à la ferme injectent sur le réseau. Pour les unités en cogénération, la majeure partie de la chaleur qu'elles produisent est utilisée localement, par exemple pour chauffer des élevages, des serres ou quelques habitations proches, ou pour le séchage de fourrages ou de bois énergie. Environ 20 % sont injectés dans des réseaux de chaleur, pour les installations situées à proximité. La priorisation à l'injection s'effectue dès 2022 et devient clairement visible à partir de 2030. À partir de cette date, toutes les nouvelles installations se font en injection. Sur certains méthaniseurs à la ferme, une alimentation directe (hors réseau de gaz) des engins agricoles locaux en bioGNV est organisée, essentiellement dans un objectif d'autonomie. En 2050, ces usages directs du GNV restent faibles (2 TWh_{PCI}) mais croissants. Enfin, toutes les unités de méthanisation des industries agroalimentaires permettent une autoconsommation directe de la chaleur par l'industriel. La taille des installations en injection s'accroît, dans un objectif de rentabilité économique poussé par les cibles de tarif d'achat de la PPE. Ainsi, en 2050 une dizaine d'installations atteignent des débits d'environ 2 000 Nm^3/h. Ces grandes installations restent toutefois marginales et l'augmentation de la taille des installations est modérée en moyenne. Les unités à la ferme affichent des débits de 150 à 350 Nm^3/h, avec une moyenne d'environ 250 Nm^3/h. Les installations centralisées suivent cette tendance, avec une moyenne d'environ 350 à 400 Nm^3/h. Les installations en cogénération restent sur des capacités similaires à celles d'aujourd'hui et sont plus modérées que les installations en injection (200 kWe en moyenne).

Les **rendements** évoluent entre 2030 et 2050 grâce à des optimisations technologiques et énergétiques : épuration optimale du biométhane, traitement des off-gaz[11], mise en place de prétraitement des substrats, amélioration de l'isolation, etc. Pour l'injection de biométhane, le rendement global de conversion, qui intègre les besoins de chauffage du méthaniseur, s'établit à 87 % en 2030 et 90 % en 2050 (méthane injecté [PCI]/énergie primaire [PCI]). Pour la cogénération, le rendement électrique est de 35 % en 2030 puis 40 % en 2040, tandis que le rendement en chaleur est de 20 % en 2030 et 2050[12].

Les **matières méthanisées** varient d'un territoire à un autre, en fonction du tissu économique et du type d'agriculture pratiquée. Globalement, plus qu'aujourd'hui, la méthanisation se développe en valorisation des produits, sous-produits et déchets agricoles. En 2050, ces derniers représentent 92 % en énergie primaire des substrats méthanisés. La pratique des cultures intermédiaires et leur collecte pour leur valorisation en méthanisation, en particulier, s'est standardisée sur les exploitations agricoles : les CIVE représentent 33 % des intrants de la méthanisation. La valorisation des déjections d'élevage s'est également développée, dans des schémas d'élevage où elle est facilitée (majoritairement en bâtiments). Ces effluents représentent ainsi en 2050 27 % des intrants en énergie primaire. Cette part d'origine animale diminue donc par rapport à aujourd'hui. Les unités de méthanisation reçoivent également des résidus de cultures et de l'herbe de prairies (respectivement 16 % et 7 % de l'énergie primaire en 2050). La part des cultures énergétiques dédiées reste au même niveau qu'aujourd'hui, à 7 %. La limite actuelle de 15 % du tonnage entrant, sur une moyenne triennale glissante, reste donc respectée. En dehors de ces produits agricoles, la part des biodéchets méthanisés augmente par rapport à aujourd'hui. Il s'agit essentiellement de biodéchets de ménages, d'herbes de bords de route, de boues de stations d'épuration urbaines et d'effluents des industries agroalimentaires. Les ressources primaires valorisées en méthanisation en 2050 représentent un total de 90 TWh_{PCI} en énergie primaire. Elles sont détaillées dans le *Tableau 2*.

11 Gaz pauvre d'éjection issu de l'épuration du biogaz et contenant une fraction de méthane.
12 Rendements établis d'après expertise ADEME, hors microcogénération, en particulier d'après [16].

Tableau 2 Substrats mobilisés en méthanisation dans le scénario tendanciel en 2050

	CIVE	Cultures dédiées	Prairies	Résidus de culture	Effluents d'élevage	Déchets IAA	Algues
Principales hypothèses	Rendement : 8 tMS/ha	Surfaces : 172 kha Rendement : 15 tMS/ha	Rendements : 5 (permanentes)- 9 (temporaires) tMS/ha	Export (de la parcelle) : ⅓ de la production de pailles	-	Activité IAA : selon scénario	Non valorisées en méthanisation
Taux de mobilisation	15 %	100 %	5 %	50 %	35 %	100 % coproduits non valorisés	-
Gisement mobilisé (MtMS)	12,5	2,6	3,3	14	-	-	0
Énergie primaire (TWh_{PCI}) non alimentaires	30,4	6,3	8,1	14,5	24,3	1,5	0

4.2. Scénario 1 : une décarbonation importante du gaz grâce à une sobriété généralisée

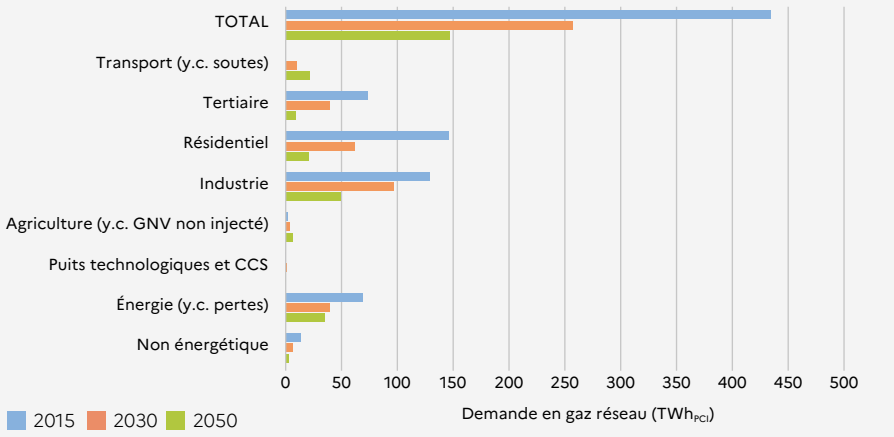
Les évolutions sont guidées par une baisse de la demande globale en énergie, tirée par une sobriété généralisée.

Ainsi, le gaz est globalement beaucoup moins utilisé qu'actuellement. Sa **consommation** s'élève à 258 TWh_{PCI} en 2030 et 148 TWh_{PCI} en 2050, en baisse de respectivement 41 % et 66 % par rapport à 2015 *(Graphique 5)*. Par ailleurs, la répartition de l'utilisation du gaz par secteur évolue drastiquement par rapport à aujourd'hui. Comme pour le scénario tendanciel, seul le secteur des transports voit sa consommation de gaz augmenter : multipliée par 24 par rapport à 2015, elle représente 15 % de la consommation de gaz en 2050. Le gaz est utilisé essentiellement pour le transport lourd et longue distance : autocars, poids lourds, trains. Tous les autres secteurs réduisent très fortement leur utilisation de gaz. Dans l'industrie (34 % de la consommation de gaz en 2050, hors usages non énergétiques), c'est essentiellement la forte baisse des volumes de production qui guide la consommation énergétique des différentes branches. Pour le gaz, cette forte baisse n'est que très partiellement compensée par le remplacement du charbon et des produits pétroliers par le gaz de réseau. La consommation de gaz y diminue de 61 % par rapport à 2015. Les bâtiments, dans une recherche d'autonomie, recourent à des énergies facilement et rapidement mobilisables. On assiste à une sortie progressive du gaz au fur et à mesure des rénovations.

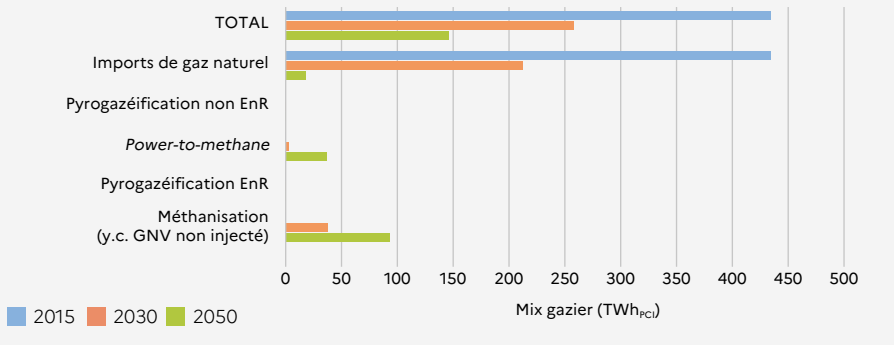
En 2050, ce sont principalement les logements collectifs chauffés au gaz en individuel, ceux pour lesquels un changement d'équipement est le plus difficile, qui restent au gaz, avec une chaudière à condensation. En 2050, le nombre de logements raccordés au réseau de gaz est donc nettement inférieur à celui de 2015 (3 millions de logements raccordés contre 10 millions en 2015). Le résidentiel représente finalement 14 % de la consommation de gaz en 2050 et le tertiaire 6 %. Ces secteurs affichent la plus forte baisse de leur demande en gaz par rapport à 2015 : - 86 % par rapport à 2015 pour le résidentiel et - 87 % pour le tertiaire. Alors qu'ils représentaient en 2015 la moitié de la consommation de gaz, ces usages présentent le plus fort potentiel de substitution d'énergie et ont donc été le plus réduits. Enfin, les besoins de flexibilité du système électrique sont majoritairement assurés par la pilotabilité de la demande. Aussi, dans les modélisations préliminaires du mix électrique réalisées pour ce scénario, la production d'électricité à partir de turbines à gaz est limitée à 4 % de la production d'électricité en 2050. La branche énergie représente globalement 24 % de la consommation de gaz en 2050.

Grâce à cette importante baisse de la demande en gaz, celui-ci est très fortement d'origine renouvelable en 2050, grâce au couplage méthanisation/*power-to-methane* *(Graphique 6)*.

Graphique 5 *Demande en gaz dans S1 en 2015, 2030 et 2050*



Graphique 6 *Mix de gaz dans S1 en 2015, 2030 et 2050*



Comme dans les autres scénarios, **la méthanisation** se généralise sur les exploitations agricoles. Elle permet aux agriculteurs de contribuer à l'échelle territoriale à la production d'énergie tout en leur apportant un revenu direct et d'être plus autonomes dans leur utilisation de fertilisants grâce à l'épandage des digestats. La filière se développe intensément : + 3 TWh/an en moyenne. Le biométhane représente 15 % de la consommation de gaz en 2030 (38 TWh$_{PCI}$) et 63 % en 2050 (94 TWh$_{PCI}$). Les objectifs actuels de la PPE en 2028 sont donc dépassés.

Les **types de valorisation** en 2050 – cogénération, injection de biométhane dans le réseau, usages directs de bioGNV pour engins agricoles, chaudière biogaz pour les industries agroalimentaires – et les **rendements** associés sont les mêmes que pour le scénario tendanciel. En revanche, la méthanisation se développe davantage à l'échelle des territoires, dans une logique de sobriété, de circuits courts et autour d'exploitations agricoles de taille modeste. La taille des équipements varie suivant l'organisation de l'agriculture dans le territoire, mais elle reste relativement limitée. La plupart des unités à la ferme regroupent un petit nombre d'agriculteurs et affichent des débits d'injection entre 50 et 250 Nm³/h. La moyenne se situe à environ 150 Nm³/h, proche de celle du schéma actuel de la méthanisation. Les installations centralisées suivent cette tendance, avec une moyenne d'environ 250 Nm³/h. Elles sont environ 6 000 en 2050, réparties sur tout le territoire. On compte également environ 900 installations en cogénération en 2050.

En comparaison à aujourd'hui et au scénario tendanciel, la part animale des **substrats valorisés en méthanisation** diminue. En effet, la diminution des cheptels, liée à la diminution de la consommation de viande, se traduit directement par des gisements de déjections animales moins importants. Les taux de mobilisation de ces déjections sont par ailleurs relativement limités en raison d'un élevage plus extensif et d'un allongement de la durée de pâturage qui restreignent les possibilités de collecte. *In fine*, ces effluents représentent 9 % de l'énergie primaire méthanisée en 2050. À l'inverse, la diminution des cheptels conduit à réduire les quantités de pailles nécessaires à la litière animale. Les pratiques agri-

coles évoluent également pour mieux récolter, transporter et stocker les résidus de cultures en vue de les méthaniser. Leurs volumes sont donc plus importants que dans les scénarios à forte consommation de viande. Ces résidus représentent 31 % des intrants méthanisés en 2050 en énergie primaire. Les CIVE représentent quant à elles 42 % des intrants de la méthanisation et les prairies et herbes de bord de route 13 %. Afin de limiter la compétition avec l'alimentation humaine, aucune culture énergétique n'est dédiée à la méthanisation. Les ressources primaires valorisées en méthanisation en 2050 représentent un total de 109 TWh_{PCI} en énergie primaire. Elles sont détaillées dans le *Tableau 3*.

En ce qui concerne la pyrogazéification, la filière ne se développe pas, faute de ressource disponible. En effet, sur le bois et ses sous-produits, les besoins pour la construction et la rénovation ainsi que pour le bois énergie sont importants (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*). Pour ce qui est des déchets, les importants efforts de prévention, notamment *via* la réduction de la consommation et du gaspillage alimentaire, ne permettent pas de dégager des intrants pour cette filière.

À partir de 2028, **l'installation d'unités de *power-to-methane* sur la quasi-totalité des installations de méthanisation en injection** permet d'obtenir un gaz fortement renouvelable en 2050 ; le *power-to-methane* représente 25 % de la consommation de gaz en 2050 (36 TWh_{PCI}). Ces unités de petite taille (électrolyseurs de quelques MW) fonctionnent partiellement sur l'année, sur une durée moyenne de 2 000 h à 3 000 h par an, en fonction des excédents de production d'électricité renouvelable. Le rendement global de la chaîne *power-to-methane* est de 54 % (PCI) en 2030 puis atteint 61 % en 2050[13].

Globalement, l'équilibrage entre l'offre et la demande en gaz rend nécessaire l'importation de 18 TWh_{PCI} de gaz naturel en 2050. Les imports de méthane renouvelable ont été écartés, pour ne pas peser sur la transition écologique des pays étrangers. Ce choix est également fait par prudence vis-à-vis des fortes incertitudes sur les capacités d'exportation des pays étrangers, les coûts du gaz renouvelable importé et la chaîne d'approvisionnement de ce gaz. **Finalement, le niveau global de décarbonation du gaz est de 88 %.**

4.3. Scénario 2 : une demande contrainte par l'offre en gaz renouvelable et qui s'ajuste à la baisse

Les évolutions de S2 sont guidées par une évolution concertée de l'offre et de la demande. Les efforts de sobriété, en particulier, sont importants. Pour le gaz, la situation est proche de S1 : la décarbonation est fortement contrainte par les volumes disponibles de gaz renouvelable et la demande s'ajuste en conséquence à la baisse. Cette baisse de la demande passe notamment par d'importantes substitutions par d'autres vecteurs énergétiques, en particulier dans le bâtiment et la branche énergie.

La **consommation de gaz** est similaire à celle de S1 ; le gaz est beaucoup moins utilisé qu'actuellement *(Graphique 7)*. Sa consommation globale est de 299 TWh_{PCI} en 2030 et 158 TWh_{PCI} en 2050, soit une baisse de respectivement 31 % et 64 % par rapport à 2015. Dans le secteur des transports, le gaz entre en concurrence avec l'hydrogène, qui se développe en utilisation sur les mêmes usages que le GNV : poids lourds, véhicules utilitaires, bus et cars. La demande

Tableau 3 Substrats mobilisés en méthanisation dans le scénario 1 en 2050

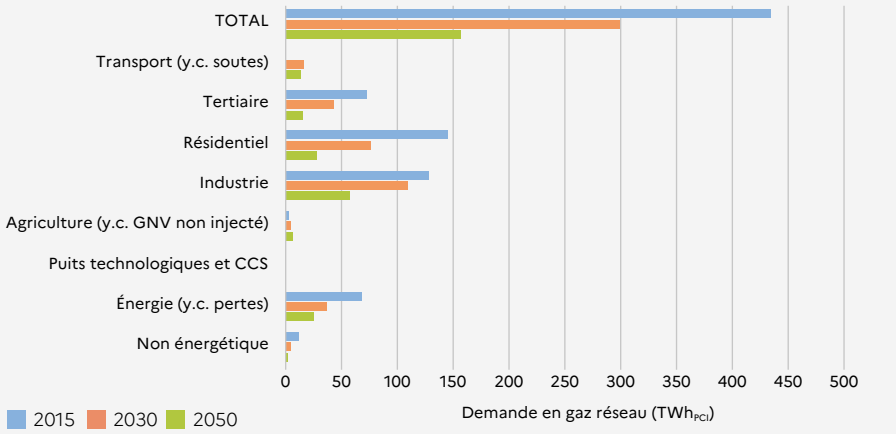
	CIVE	Cultures dédiées	Prairies	Résidus de culture	Effluents d'élevage	Déchets IAA	Algues
Principales hypothèses	Rendement : 6 tMS/ha	Aucune	Rendements : 5 (permanentes)- 9 (temporaires) tMS/ha	Export (de la parcelle) : ⅓ de la production de pailles	-	Activité IAA : selon scénario	Non valorisées en méthanisation
Taux de mobilisation	25 %	-	10 %	100 %	20 %	100 % coproduits non valorisés	-
Gisement mobilisé (MtMS)	18,9	0	5	16,4	-	-	0
Énergie primaire (TWh_{PCI})	46	0	12,5	33,3	9,8	1	0

13 Avec en 2030 puis 2050 respectivement un rendement de l'électrolyse de 65 % puis 72 % et de méthanation de 83 % puis 85 %. Ces rendements sont issus de l'expertise de l'ADEME, en particulier à partir de [17] et [18].

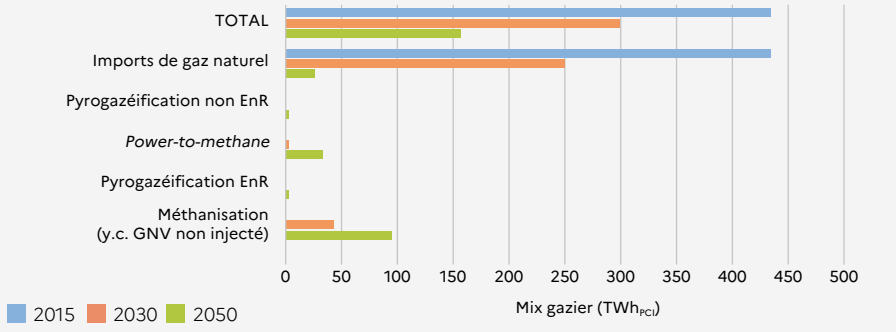
en GNV est donc plus faible que dans S1. Elle reste toutefois en forte augmentation par rapport à 2015 puisqu'elle est multipliée par 17 par rapport à 2015 pour atteindre 10 % de la consommation de gaz en 2050. Tous les autres secteurs réduisent fortement leur consommation. Cette diminution est vraie dans l'industrie (37 % de la consommation de gaz en 2050, hors usages non énergétiques), malgré la substitution du charbon et des produits pétroliers par du gaz de réseau. En effet, c'est essentiellement la forte baisse des volumes de production qui guide la consommation énergétique des différentes branches, ainsi qu'une modeste amélioration de l'efficacité énergétique. La consommation de gaz y diminue de 55 % par rapport à 2015. Dans le résidentiel, le niveau de substitution des chaudières à condensation vers des équipements utilisant d'autres énergies lors des rénovations est légèrement moins soutenu que dans S1. Ainsi, 14 % logements restent raccordés au gaz en 2050 (contre 35 % en 2015). Les chaudières à condensation existantes en 2015 sont maintenues dans tous les logements collectifs chauffés au gaz en individuel ainsi que dans certaines maisons individuelles. Le résidentiel représente finalement 18 % de la consommation de gaz en 2050 et le tertiaire 11 %, soit une baisse de respectivement 80 % et 77 % par rapport à 2015. Enfin, comme dans S1, les besoins de flexibilité du système électrique sont majoritairement assurés par la pilotabilité de la demande. Aussi, dans les modélisations préliminaires du mix électrique réalisées pour ce scénario, la production d'électricité à partir de turbines à gaz est limitée à environ 2 % de la production d'électricité en 2050. La branche énergie représente globalement 18 % de la consommation de gaz en 2050.

La production de gaz renouvelable est quasiment la même que dans S1, avec 45 TWh_{PCI} en 2030 et 130 TWh_{PCI} en 2050 *(Graphique 8)*.

Graphique 7 Demande en gaz dans S2 en 2015, 2030 et 2050



Graphique 8 Mix de gaz dans S2 en 2015, 2030 et 2050



Comme dans les autres scénarios, la méthanisation se généralise dans les exploitations agricoles. La recherche d'autonomie des agriculteurs à l'échelle des territoires est forte et la méthanisation y contribue. La filière évolue dans une logique similaire à celle de S1. Elle se bâtit en particulier sur des tailles d'unités, une valorisation, des rendements et des substrats comparables. Elle se développe à un rythme intense, de + 3,1 TWh/an en moyenne. Le biométhane représente 14 % de la consommation de gaz en 2030 (42 TWh_{PCI}) et 60 % en 2050 (95 TWh_{PCI}). Les objectifs actuels de la PPE en 2028 sont donc dépassés. On dénombre environ 6 000 installations en injection en 2050 et 900 installations en cogénération. Les ressources primaires valorisées en méthanisation en 2050 représentent un total de 110 TWh_{PCI} en énergie primaire. Elles sont détaillées dans le *Tableau 4*.

En ce qui concerne la **pyrogazéification**, la filière se développe modestement, uniquement pour valoriser les CSR produits et non valorisés par ailleurs. La récolte de bois, bien que supérieure à celle de S1, reste limitée tandis que les besoins en bois énergie sont importants (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). Pour ce qui est des déchets, les importants efforts de prévention, notamment *via* la réduction de la consommation et du gaspillage alimentaire, limitent les volumes de CSR produits. En 2050, environ 60 unités gazéifient globalement 1,6 Mt de CSR. Ces unités injectent 5 TWh_{PCI} de méthane de synthèse dans le réseau, dont 3 TWh_{PCI} peuvent être considérés comme renouvelables[14]. Les unités sont de tailles modérées, adaptées à des ressources locales et plus facilement finançables : on retient une fourchette de 3 à 20 MW avec une moyenne de 11,1 MW (gaz) [7]. Le rendement PCI est de 63 % en moyenne, d'après l'étude bibliographique réalisée dans l'étude ADEME (2018).

Enfin, la filière ***power-to-methane*** se développe comme dans S1 en couplage avec les méthaniseurs pour valoriser le CO_2 biogénique produit par la méthanisation à partir de 2028. Ce développement est toutefois légèrement restreint par rapport à S1 par la concurrence avec l'augmentation des usages directs de l'hydrogène dans la mobilité et l'industrie (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*). Le méthane de synthèse répond finalement à 20 % de la consommation de gaz en 2050 (32 TWh_{PCI}). Les unités sont de petite taille, équipées d'électrolyseurs de quelques MW et fonctionnent en moyenne 2 000 h à 3 000 h par an, suivant les excédents de production d'électricité renouvelable, avec le même rendement global que dans S1. En 2050, quasiment toutes les installations de méthanisation en injection sont associées à un électrolyseur et une unité de méthanation.

Globalement, l'équilibrage entre l'offre et la demande en gaz rend nécessaire l'importation de 25 TWh_{PCI} de gaz naturel en 2050. Les imports de méthane renouvelable ont été écartés, pour les mêmes raisons que dans S1. Finalement, **le niveau global de décarbonation du gaz est de 82 %**.

4.4. Scénario 3 : la diversification du mix permet une offre de gaz renouvelable importante

Le défi de ce scénario consiste à réussir la décarbonation du gaz sans en modifier en profondeur les usages. D'importants efforts sont donc faits sur les volumes et la diversification de l'offre en gaz renouvelable.

Du côté de la **demande**, peu d'efforts sont faits sur la sobriété. Grâce à d'importants moyens déployés sur l'innovation technique, l'efficacité des équipements est largement améliorée. Enfin, l'électrification des procédés progresse, notamment dans l'industrie

Tableau 4 Substrats mobilisés en méthanisation dans le scénario 2 en 2050

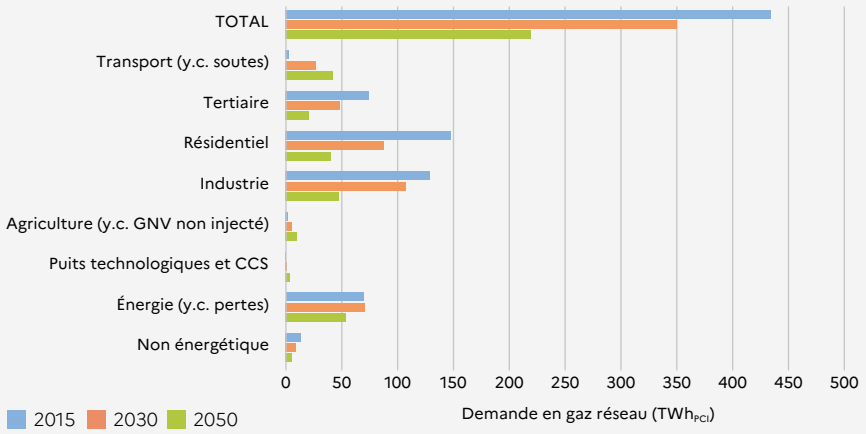
	CIVE	Cultures dédiées	Prairies	Résidus de culture	Effluents d'élevage	Déchets IAA	Algues
Principales hypothèses	Rendement : 6 tMS/ha	Aucune	Rendements : 5 (permanentes)- 9 (temporaires) tMS/ha	Export (de la parcelle) : ⅓ de la production de pailles	-	Activité IAA : selon scénario	Non valorisées en méthanisation
Taux de mobilisation	25 %	-	10 %	100 %	20 %	100 % coproduits non valorisés	-
Gisement mobilisé (MtMS)	19	0	6,3	14,8	-	-	0
Énergie primaire (TWh_{PCI})	46,2	0	15,7	30,2	10,6	1,6	0

14 Avec une hypothèse de fraction biogénique moyenne des CSR de 60 %, d'après [19].

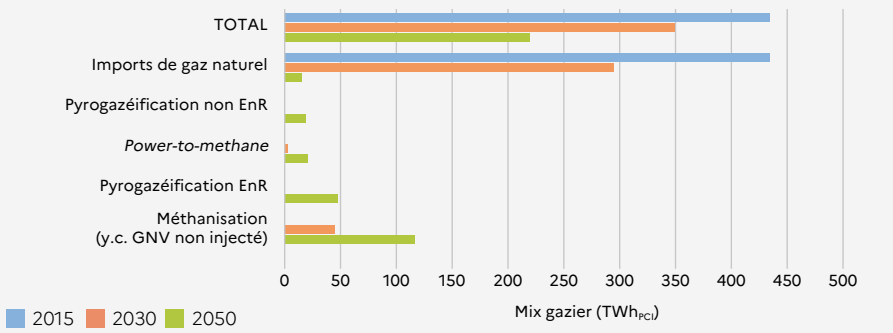
et le bâtiment. Ces éléments conduisent à une demande globale en gaz significativement réduite par rapport à aujourd'hui *(Graphique 9)*. Elle est de 349 TWh_{PCI} en 2030 et 219 TWh_{PCI} en 2050, en baisse de respectivement 20 % et 50 % par rapport à 2015. À l'instar de S1 et S2, la répartition de l'utilisation du gaz par secteur évolue en profondeur par rapport à 2020. L'augmentation des usages du GNV est telle que la demande du transport s'élève à des niveaux proches de celle du résidentiel, de l'industrie ou de la branche énergie. La demande en GNV, essentiellement pour les poids lourds, les véhicules utilitaires, les bus et les cars, est multipliée par 44 par rapport à 2015 et représente 19 % de la consommation de gaz en 2050. L'industrie, le résidentiel et le tertiaire réduisent fortement leur demande, mais de manière plus modérée que dans S1 et S2. Dans l'industrie, malgré la substitution du charbon et des produits pétroliers par du gaz de réseau, la consommation de gaz diminue de 63 % par rapport à 2015, notamment en raison d'une électrification de tous les procédés et des chaudières où c'est possible ainsi qu'une baisse générale des volumes de production. Dans le résidentiel, les pompes à chaleur hybrides se développent dans les maisons individuelles et les logements collectifs de façon plus importante que dans les autres scénarios, ce qui permet de baisser la pointe de demande électrique en hiver. Des chaudières à condensation sont également installées en rénovation dans les logements collectifs chauffés individuellement et les maisons individuelles. Le nombre de raccordements au réseau de gaz (9,2 millions de logements) est ainsi quasiment maintenu par rapport à 2015. Le résidentiel représente finalement 18 % de la consommation de gaz en 2050 et le tertiaire 9 %, soit une diminution de 73 % et 72 % par rapport à 2015. Enfin, sur le plan du système électrique, la croissance de la demande en électricité s'accompagne d'un fort développement de la pilotabilité de la demande qui assure une large part des besoins de flexibilité. Aussi, dans les modélisations préliminaires du mix électrique réalisées pour ce scénario, la production d'électricité à partir de turbines à gaz est limitée à 4 % de la production d'électricité en 2050. La branche énergie représente globalement 24 % de la consommation de gaz en 2050.

Du côté de l'offre, ce scénario présente le mix gazier le plus diversifié et la production de gaz renouvelable la plus importante *(Graphique 10)*. Comme dans les autres scénarios, la méthanisation se généralise sur les exploitations agricoles et la filière se développe de manière intense (+ 3,8 TWh/an en moyenne). Le biométhane représente 13 % de la consommation de gaz en 2030 (46 TWh_{PCI}) et 53 % en 2050 (116 TWh_{PCI}). Les objectifs actuels de la PPE en 2028 sont donc largement dépassés. À l'instar de S1 et S2, l'injection de biométhane est priorisée par rapport à la cogénération. Les valorisations et les rendements sont les mêmes que dans ces scénarios.

Graphique 9 Demande en gaz dans S3 en 2015, 2030 et 2050



Graphique 10 *Mix de gaz dans S3 en 2015, 2030 et 2050*



La politique agricole se tourne vers la production d'énergie, pour le biométhane comme pour les biocarburants. Les sous-produits et déchets agricoles représentent en 2050, 91 % des substrats méthanisés en énergie primaire. Les territoires agricoles sont spécialisés et la filière méthanisation s'organise avec le monde agricole. Les installations sont en moyenne de plus grande taille qu'en 2020. Les unités à la ferme affichent des débits d'injection entre 150 et 350 Nm³/h, avec une moyenne d'environ 250 Nm³/h. Les installations centralisées suivent cette tendance, avec une moyenne d'environ 350 à 400 Nm³/h. Il existe environ 4 500 installations en injection en 2050, réparties sur tout le territoire, environ 1 100 installations en cogénération.

Les **substrats** valorisés en méthanisation varient d'un territoire à un autre, en fonction de la prédominance de la culture ou de l'élevage. Les cultures intermédiaires restent la base de la filière, puisque les CIVE représentent près de 40 % des intrants en énergie primaire. Les cheptels sont plus importants que dans S1 et S2, en lien avec une baisse plus modérée de la consommation de viande. La collecte des fumiers et lisiers est également facilitée par des modes d'élevage majoritairement en bâtiments. Les effluents d'élevage représentent donc une part de l'énergie primaire totale valorisée en méthanisation plus importante que dans S1 et S2 (15 % en 2050). En revanche, la part des résidus de cultures diminue (20 % en 2050), les besoins en litière animale étant plus importants. La part des cultures énergétiques dédiées reste au même niveau qu'aujourd'hui, à 7 %. Les quantités mobilisées représentent cependant une multiplication par 7 par rapport à 2017. Les prairies et l'herbes de bord de route représentent quant à elles 15 % des intrants. Les ressources primaires valorisées en méthanisation en 2050 représentent un total de 136 TWh$_{PCI}$ en énergie primaire. Elles sont détaillées dans le *Tableau 5*.

Tableau 5 *Substrats mobilisés en méthanisation dans le scénario 3 en 2050*

	CIVE	Cultures dédiées	Prairies	Résidus de culture	Effluents d'élevage	Déchets IAA	Algues
Principales hypothèses	Rendement : 8 tMS/ha	Surfaces : 250 kha Rendement : 15 tMS/ha	Rendements : 5 (permanentes)- 9 (temporaires) tMS/ha	Export (de la parcelle) : ⅓ de la production de pailles	-	Activité IAA : selon scénario	En coproduction de biodiesel
Taux de mobilisation	25 %	100 %	10 %	100 %	35 %	100 % coproduits non valorisés	-
Gisement mobilisé (MtMS)	20,4	3,8	7,3	12,7	-	-	2,3
Énergie primaire (TWh$_{PCI}$)	49,5	9,1	18	26,3	20,2	1,7	4,6

La **pyrogazéification** se développe grâce à des politiques sylvicoles et de gestion des déchets tournées vers la production d'énergie (*cf.* chapitres *2.2.2. Production forestière* et *2.4.1. Déchets*). Les autres besoins, notamment en combustion directe, sont plus limités que dans les scénarios 1 et 2 (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). La filière voit le jour à l'échelle industrielle en 2026/2028 grâce au maintien d'investissements R&D et à un cadre règlementaire favorable. En 2030, 5 unités (de 10 à 20 MW) injectent du méthane de synthèse dans le réseau, à hauteur de 430 GWh_{PCI}. Si la technologie fonctionne davantage sur des intrants de type biomasse propre à ses débuts, elle se tourne peu à peu vers la valorisation de déchets bois et CSR. Au total, les ressources primaires valorisées en pyrogazéification en 2050 représentent un total de 107 TWh_{PCI} en énergie primaire : 70 % de CSR, 25 % de bois déchets et autres sous-produits du bois (produits connexes de scierie) et 5 % de cultures lignocellulosique (type miscanthus et switchgrass). En 2050, les projets continuent de s'orienter vers des tailles modérées, de la même manière que dans S2 et avec les mêmes rendements. Ainsi, environ 760 unités de pyrogazéification fonctionnent en 2050, pour une production totale de 67 TWh_{PCI} de méthane de synthèse (soit 31 % de la consommation de gaz), dont 48 TWh_{PCI} peuvent être considérés comme renouvelables[15]. La plupart des unités sont raccordées au réseau de transport de gaz, le bois ou les CSR étant facilement transportables. Toutefois, de plus petites unités de pyrogazéification peuvent aussi être raccordées sur le réseau de distribution afin de se rapprocher des lieux de traitement des CSR et déchets bois.

Enfin, le développement de la filière ***power-to-methane***, qui débute en 2028, est freiné par la concurrence avec des usages directs de l'hydrogène en hausse dans la mobilité et l'industrie. L'approvisionnement en électricité est en compétition avec les autres usages en forte hausse dans ce scénario. Le *power-to-methane* est donc plus limité que dans S1 et S2 : le méthane de synthèse répond à 9 % de la consommation de gaz en 2050 (20 TWh_{PCI}). Comme dans les autres scénarios, les installations de *power-to-methane* sont construites à côté de méthaniseurs pour valoriser le CO_2 biogénique produit par la méthanisation. Les unités sont de petite taille, équipées d'électrolyseurs de quelques MW et fonctionnent en moyenne 2 000 h à 3 000 h par an, en fonction des excédents de production d'électricité renouvelable, avec le même rendement global que dans les autres scénarios. En 2050, environ la moitié des installations de méthanisation en injection sont couplées à un électrolyseur et une unité de méthanation.

Globalement, l'équilibrage entre l'offre et la demande en gaz fait apparaître la nécessité d'importer 15 TWh_{PCI} de gaz naturel en 2050. Les imports de méthane renouvelable ont été écartés, pour les mêmes raisons que dans S1 et S2. **Finalement, le niveau global de décarbonation du gaz est de 84 %.**

4.5. Scénario 4 : le recours massif aux puits technologiques permet le maintien d'une forte demande en gaz

Les évolutions sont guidées par une préservation de nos modes de vie actuels. La sobriété n'est donc pas recherchée. L'efficacité énergétique et, surtout, la compensation par le déploiement massif des solutions technologiques de captage et stockage de carbone sont les principaux leviers actionnés pour parvenir à la neutralité carbone. Le scénario fait également le pari des imports de gaz renouvelable ou décarboné.

Le panorama de la **demande** en gaz en 2050 est assez proche de celui de 2015. Il se caractérise par une hausse importante des usages pour le transport ainsi qu'une baisse modérée du volume total, en particulier grâce à une électrification des procédés. La demande globale est de 450 TWh_{PCI} en 2030 et 371 TWh_{PCI} en 2050, en évolution de respectivement + 4 % et - 15 % par rapport à 2015 *(Graphique 11)*. La demande en GNV, uniquement pour les poids lourds, les véhicules utilitaires, les bus, les cars et les navires, est multipliée par 42 par rapport à 2015 et représente 11 % de la consommation de gaz en 2050. Dans l'industrie, la baisse de la consommation de gaz par rapport à 2015 est modérée à - 31 %. Au-delà de l'efficacité énergétique, assez tendancielle ici, cette baisse s'explique par une tendance à l'électrification, moins intense que dans S3 sur les procédés mais significative sur les chaudières. On observe également une légère baisse des volumes de production industrielle. Dans le résidentiel, les pompes à chaleur hybrides se développent dans les maisons individuelles et les logements collectifs (mais moins que dans S3) et permettent de baisser la pointe de demande électrique en hiver. Des chaudières à condensation sont également installées en rénovation dans les logements collectifs chauffés individuellement et dans les maisons individuelles. Le nombre de raccordements au réseau de gaz (9,9 millions de logements en 2050) se maintient par rapport à 2015. Le résidentiel représente finalement 15 % de

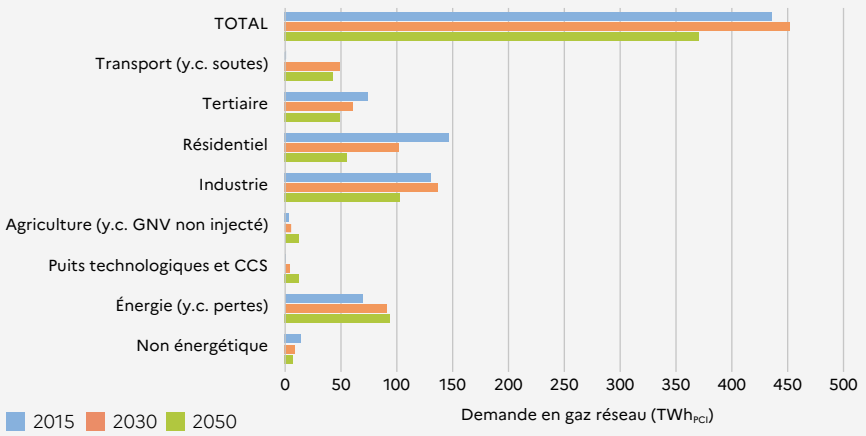
15 Avec une hypothèse de fraction biogénique moyenne des CSR de 60 % (*cf.* scénario 2).

la consommation de gaz en 2050 et le tertiaire 13 %, en diminution respective de 62 % et 34 % par rapport à 2015. Enfin, la forte croissance de la demande d'électricité et la faible diffusion de la pilotabilité de la demande nécessitent le développement de solutions de flexibilités complémentaires du système électrique. Dans les modélisations préliminaires du mix électrique réalisées pour ce scénario, les turbines à gaz se développent et assurent en 2050 6 % de la production d'électricité. Ces centrales consomment 83 TWh_{PCI} de gaz, soit 22 % de la consommation globale de gaz.

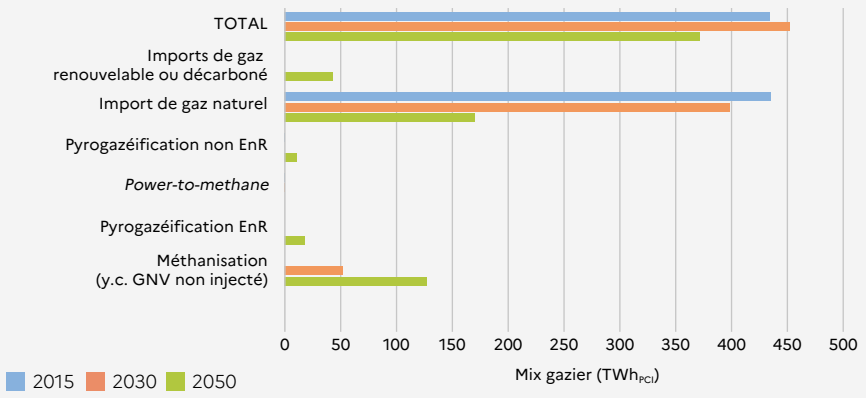
Plus que les autres scénarios, S4 mise sur une diminution des impacts climat du gaz d'origine fossile *via* la mise en place à grande échelle des technologies de CCS.

Toutefois, grâce à son potentiel important, ses coûts de production modérés et les faibles concurrences d'usages sur les matières premières méthanisées, **la méthanisation** reste un pilier de la décarbonation du mix gazier *(Graphique 12)*. Comme dans les autres scénarios, elle se généralise sur les exploitations agricoles et la filière se développe intensément à un rythme moyen de + 4,2 TWh/an. Le biométhane représente 10 % de la consommation de gaz en 2030 (46 TWh_{PCI}) et 35 % en 2050 (128 TWh_{PCI}). Les objectifs de l'actuelle PPE en 2028 sont donc largement dépassés.

Graphique 11 Demande en gaz dans S4 en 2015, 2030 et 2050



Graphique 12 Mix de gaz dans S4 en 2015, 2030 et 2050



Le mode de fonctionnement de la filière est similaire à celui de S3. Elle s'appuie sur une politique agricole tournée prioritairement vers l'alimentation puis vers la production d'énergie des territoires agricoles spécialisés et des exploitations de grande taille. Les valorisations, les rendements et les tailles moyennes des unités sont identiques à ceux de S3. Avec une moyenne d'environ 250 Nm³/h pour les installations à la ferme et de 350 à 400 Nm³/h pour les installations centralisées, on compte environ 5 000 installations en injection en 2050 et 1 200 installations en cogénération. Néanmoins, contrairement à S3, un certain nombre d'installations s'oriente vers des tailles plus importantes pour pouvoir y mettre en place une technologie de **captage et de stockage géologique** (BECCS). En 2050, 40 installations de 2 000 Nm³/h captent et stockent le CO_2 émis lors de l'épuration du biogaz, participant ainsi aux émissions négatives de la France à hauteur de 910 ktCO_2.

Les **substrats** valorisés en méthanisation sont également proches en volume et en proportion de S3, en particulier en lien avec une pratique généralisée des CIVE, des cheptels importants destinés à répondre à la demande de consommation de viande et un maintien de la part de cultures énergétiques dédiées par rapport à aujourd'hui. Les ressources primaires valorisées en méthanisation en 2050 représentent un total de 148 TWh_{PCI} en énergie primaire. Elles sont détaillées dans le *Tableau 6*.

Dans ce scénario, les investissements se tournent vers les **solutions de captage de CO_2** plutôt que vers les technologies de production de gaz renouvelable. Le CCS est notamment déployé au maximum sur les sites industriels. Au contraire, la filière ***power-to-methane*** n'émerge pas dans ce scénario. Le bilan de la consommation énergétique n'est pas en faveur de cette technologie comparé à des imports de gaz naturel associés à du DACCS, qui nécessitent néanmoins des infrastructures de transport et de stockage ou des filières de consommation pour le CO_2 capté[16]. La pyrogazéification se développe de manière plus limitée que dans S3 et uniquement *via* des installations de taille suffisante pour y mettre en place du BECCS. En 2050, 130 installations de 27 MW chacune consomment annuellement 8,9 Mt de CSR, injectent 28 TWh_{PCI} de méthane de synthèse (soit 8 % de la consommation de gaz) dont 17 TWh_{PCI} peuvent être considérés comme renouvelables et captent 1,3 Mt de carbone. Ces installations sont situées à proximité des sites de production de CSR, dans les grands centres d'activité économique et les centres urbains, reliés au réseau de gaz.

Ce scénario mise sur une spécialisation de certains pays étrangers dans la production de gaz décarboné ou renouvelable, qui leur permet d'en exporter. Par exemple, la Norvège, qui représente aujourd'hui près de la moitié des importations de gaz naturel de la France, investit actuellement massivement dans le CCS. Sur certains champs gaziers norvégiens, le CO_2 issu de la production de gaz naturel est déjà aujourd'hui capté et stocké dans des formations géologiques. En 2050, la Norvège en particulier pourrait donc exporter en France du gaz naturel décarboné. Des pays à forts potentiels de production d'électricité renouvelable ou bas carbone (solaire, éolien, hydroélectricité) pourraient également devenir exportateurs de méthane de synthèse à bas coûts, d'autant plus si les solutions de CCS se déploient et facilitent l'approvisionnement en CO_2 nécessaire à la méthanation. **La France importe ainsi dans ce scénario 44 TWh_{PCI} de gaz décarboné ou renouvelable en 2050**.

Enfin, le DACCS permet, dans ce scénario, de compenser les imports de gaz naturel fossile nécessaires pour répondre à la demande, qui s'élèvent à 170 TWh_{PCI} en 2050, soit 35 MtCO_2. **Le niveau global de décarbonation du gaz est de 51 %.**

Tableau 6 Substrats mobilisés en méthanisation dans le scénario 4 en 2050

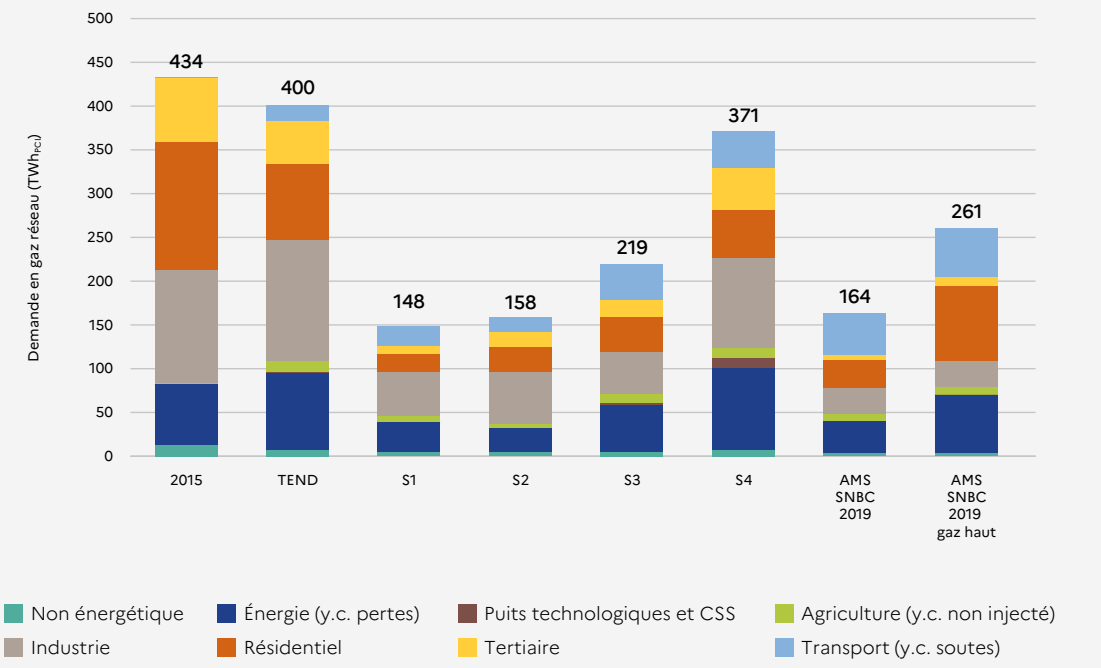
	CIVE	Cultures dédiées	Prairies	Résidus de culture	Effluents d'élevage	Déchets IAA	Algues
Principales hypothèses	Rendement : 8 tMS/ha	Surfaces : 275 kha Rendement : 15 tMS/ha	Rendements : 5 (permanentes)- 9 (temporaires) tMS/ha	Export (de la parcelle) : ⅓ de la production de pailles	-	Activité IAA : selon scénario	En coproduction de biodiesel
Taux de mobilisation	25 %	100 %	10 %	100 %	35 %	100 % coproduits non valorisés	-
Gisement mobilisé (MtMS)	22,8	4,1	6,8	15,8	-	-	2,3
Énergie primaire (TWh_{PCI})	55,3	10	16,8	33	20,6	1,9	4,6

16 Avec des hypothèses de rendement global de la chaîne *power-to-methane* de 61,2 % (PCI), d'un facteur d'émissions à la combustion du gaz naturel de 205,2 gCO_2eq/kWh_{PCI} et d'une consommation électrique du DACCS de 1,5 MWh/tCO_2.

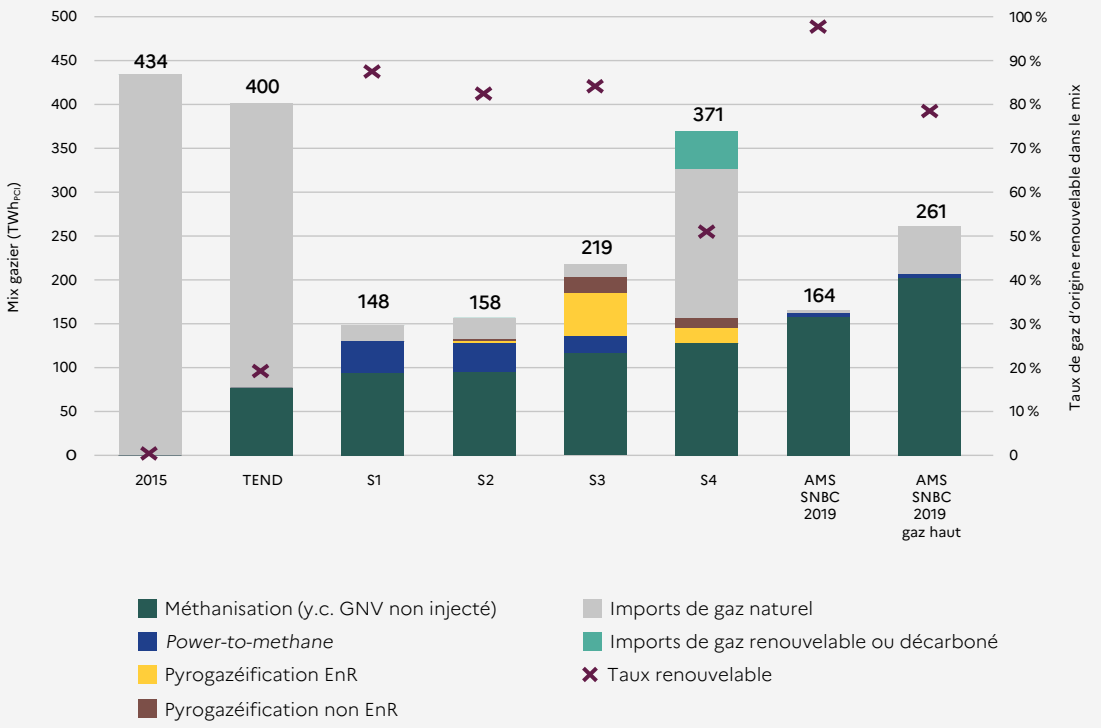
5. Comparaison des scénarios

Les grandes tendances sur l'offre et la demande en gaz se retrouvent dans le *Graphique 13* et le *Graphique 14*, qui présentent une synthèse de la situation du gaz en 2050 pour les cinq scénarios ADEME, le scénario AMS dans sa référence et dans sa variante gaz haut et la situation en 2015. Le *Graphique 15* présente les émissions de GES liées au gaz de réseau.

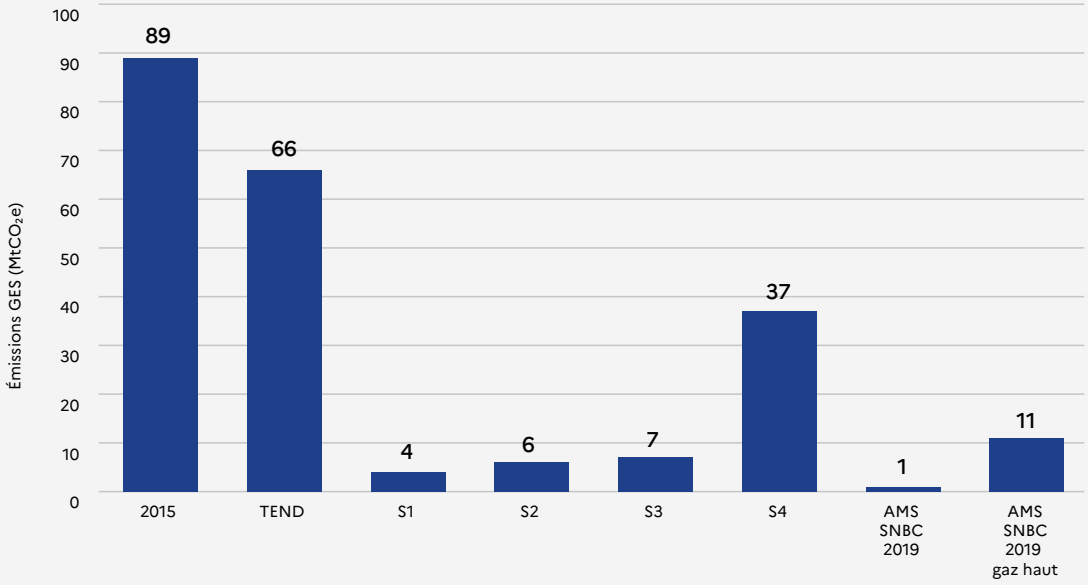
Graphique 13 Demande en gaz en 2015 et en 2050 pour les cinq scénarios ADEME et le scénario AMS (référence et variante gaz haut)



Graphique 14 Mix gazier en 2015 et en 2050 pour les cinq scénarios ADEME et le scénario AMS (référence et variante gaz haut)



Graphique 15 Émissions de GES liées au gaz de réseau en 2015 et en 2050 pour les cinq scénarios ADEME et le scénario AMS (référence et variante gaz haut)[17]



17 En considérant un facteur d'émissions à la combustion de 205,2 gCO_2eq/kWh_{PCI} pour le gaz d'origine fossile et de 0 gCO_2eq/kWh_{PCI} pour le gaz d'origine renouvelable (données CITEPA).

6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures

6.1. Enseignements pour le secteur du gaz

Face à une situation actuelle où l'injection de biométhane représente moins de 1 % du gaz consommé en France, le reste étant du gaz naturel d'origine fossile importé, la décarbonation du gaz d'ici 2050 est un défi de taille. Toutefois, **le potentiel de développement des différentes filières de production de gaz renouvelable à l'horizon 2050 est très important par rapport à aujourd'hui**. En tenant compte des arbitrages avec les autres besoins sur la ressource primaire, le niveau de production de gaz décarboné varie entre 130 TWh_{PCI} et 185 TWh_{PCI} en 2050.

Ces faibles volumes, comparés à la consommation actuelle de gaz (entre 30 % et 43 %), traduisent les **limites des ressources disponibles** pour la production de gaz. L'atteinte de la neutralité carbone passe donc nécessairement par **une diminution de la demande en gaz et/ou par le développement de solutions technologiques de captage et de stockage du carbone**, stratégies qui présentent évidemment des impacts industriels et territoriaux très différents.

Le potentiel de développement des différentes filières de production de gaz renouvelables à l'horizon 2050 est très important par rapport à aujourd'hui.

Ainsi, les efforts de sobriété sont particulièrement importants dans S1 et S2. Les équipements sont également plus efficaces sur le plan énergétique, en particulier dans S3. Dans les scénarios où la tension sur l'offre en gaz renouvelable est la plus forte, ces leviers ne suffisent pas et s'accompagnent d'importantes substitutions d'équipements fonctionnant au gaz par des équipements alimentés par d'autres énergies. Ces substitutions sont toutefois difficiles, voire impossibles à réaliser sur certains usages comme le gaz matière première, la mobilité ou l'industrie haute température. Le gaz reste également un vecteur important pour la flexibilité du système électrique et la gestion de la pointe hivernale grâce à d'importantes capacités de stockage, surtout dans S4. Ces usages du gaz sont donc priorisés. Finalement, la répartition de la demande en gaz est radicalement modifiée par rapport à aujourd'hui, surtout dans les scénarios avec de faibles niveaux d'offre. Alors que le résidentiel et le tertiaire représentent en 2015 près de la moitié de la consommation de gaz, leur part n'est que de 20 % à 29 % en 2050 dans les quatre scénarios. En effet, le chauffage des bâtiments privilégie des énergies efficaces et facilement disponibles, en particulier *via* une électrification importante par recours à des pompes à chaleur. Dans S1 et S2, les chaudières à bois sont également largement utilisées. À l'inverse, l'utilisation du GNV dans les transports, aujourd'hui marginale, se développe dans tous les scénarios sur les usages difficiles à décarboner, notamment le transport longue distance. Dans S4, la sobriété n'est pas véritablement recherchée et c'est davantage l'électrification généralisée des usages qui permet de diminuer la consommation globale.

La méthanisation pour production de biométhane est le pilier de la décarbonation du gaz, quel que soit le scénario. Il s'agit en effet de la seule voie actuellement mature de production de gaz renouvelable, dont le déploiement est déjà amorcé et qui présente un potentiel important. L'injection de biométhane dans le réseau en 2050 atteint de 92 TWh_{PCI} à 126 TWh_{PCI} selon les scénarios. Quels que soient les systèmes de production agricole envisagés, des plus extensifs et diversifiés aux plus intensifs et spécialisés, la méthanisation trouve sa place grâce aux bénéfices qu'elle apporte aux agriculteurs : valorisation agronomique des effluents d'élevage, complément de revenu, contribution à la production d'énergie, contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre… **La pratique des cultures intermédiaires et leur valorisation en méthanisation est un élément clé de la filière puisque ces intrants représentent de 37 % à 42 % de l'énergie primaire méthanisée**. Dans les scénarios où l'agriculture est particulièrement poussée vers la production d'énergie (S3 et S4), **les cultures énergétiques dédiées** continuent à contribuer à la production d'énergie tout en ne remettant pas en question la limite règlementaire actuelle de 15 % du tonnage entrant. À l'inverse, S1 et S2 parviennent à des niveaux élevés d'injection de biométhane sans avoir besoin de recourir à des cultures

dédiées, notamment grâce à une meilleure valorisation des sous-produits agricoles par rapport à aujourd'hui. Au-delà des volumes totaux de biométhane produit, c'est beaucoup **l'organisation de la filière** qui différencie les scénarios, en termes de tailles des installations, de répartition sur le territoire, du nombre d'exploitants par méthaniseur, des substrats méthanisés en cohérence avec le système agricole territorial… Malgré tout, tous les scénarios reposent sur des installations de **tailles modérées** (au plus 400 Nm^3/h en moyenne pour les unités centralisées de S3 et S4), dans la poursuite de ce qui se fait aujourd'hui, afin de favoriser la résilience de ces installations. Seul S4 voit apparaître quelques dizaines d'installations de plus grande taille (2 000 Nm^3/h), dans le but de pouvoir y développer du BECCS.

La deuxième voie fondamentale de décarbonation du gaz repose sur le couplage de la méthanisation avec le *power-to-methane*. Ce fonctionnement en duo permet de valoriser le CO_2 biogénique émis par la méthanisation et donc d'augmenter le productible de gaz à partir de la même ressource en biomasse. Les coûts de production du méthane de synthèse sont limités par l'utilisation, pour le méthane de synthèse, des mêmes infrastructures d'injection dans le réseau que le biométhane et par un approvisionnement en électricité basé sur les excédents de production des énergies renouvelables. Le développement du *power-to-methane* est toutefois limité par les volumes d'électricité requis et peut se trouver en concurrence avec la croissance des usages directs de l'hydrogène comme dans S3. Dans ce scénario, la production de méthane de synthèse en 2050 est de 17 TWh_{PCI} tandis qu'elle est de 36 TWh_{PCI} dans S1, dans lequel l'utilisation directe d'hydrogène est quasiment absente (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*).

La pyrogazéification peut être une voie complémentaire de décarbonation du gaz selon l'origine de la biomasse. Sa présence dans le mix gazier en 2050 est toutefois dépendante des ressources disponibles pour cette valorisation. Elle dépend en effet tout d'abord des politiques de gestion des forêts – préservation de la biodiversité, préservation des puits carbone… – et des déchets – réduction à la source… Celles-ci déterminent les ressources totales de biomasse et déchets carbonés non recyclables. Elle dépend en outre des autres usages de ces intrants pour la fabrication de matériaux, le bois énergie ou la production de biocarburants liquides avancés. Ainsi, dans S1, la tension sur la ressource est trop forte pour que la filière pyrogazéification puisse apparaître et celle-ci ne se développe qu'à la marge dans S2. Elle tient un rôle important dans S3, dans lequel la production sylvicole est plus intensive, la politique de gestion des déchets est davantage tournée vers la production d'énergie et les besoins en combustion sont moins importants. La technologie représente alors 67 TWh_{PCI} en 2050. Dans S4, la filière peut aussi se développer grâce à la politique de gestion des déchets, mais de manière moins importante que dans S3. L'impact carbone global de la pyrogazéification dépend de ses approvisionnements. Dans le cas du bois forestier, largement minoritaire dans les intrants de la pyrogazéification et uniquement dans S3, cette filière réduit le niveau de stockage du carbone dans les forêts (*cf.* chapitres *2.2.2. Production forestière* et *2.4.3 Puits de carbone*).

Malgré le développement de la production nationale de gaz renouvelable et bas carbone et la diminution de la demande, **la France reste dépendante des importations de gaz, dans tous les scénarios**. Dans les scénarios 1, 2 et 3, les importations de gaz naturel sont limitées (15 à 25 TWh_{PCI}). Dans S1 et S2, le plus faible recours à la biomasse, la forte réduction de l'artificialisation des sols et le développement de pratiques agricoles « stockantes » permettent de disposer de puits naturels à même de compenser ces émissions (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*). Dans S3 et S4, **la réduction des impacts GES du gaz passe aussi par le CCS**, déployé sur les sites industriels de tout le territoire. Pour atteindre la neutralité carbone, S4 parie davantage sur le **DACCS**, supposé opérationnel et économiquement supportable, et sur le **BECCS**, mis en place systématiquement sur les installations de pyrogazéification et sur quelques dizaines de grosses unités de méthanisation. Ces technologies permettent de compenser les impacts climat des importations significatives de gaz naturel d'origine fossile nécessaires pour répondre à la demande. **Les importations de gaz renouvelable ou décarboné** ne sont quant à elles envisagées que dans S4. Cette option est écartée dans les autres scénarios en raison des fortes incertitudes sur les capacités d'exportation des pays étrangers, du manque de maîtrise de la chaîne d'approvisionnement et pour ne pas peser sur la transition écologique des autres pays.

6.2. Politiques publiques structurantes

Les changements affichés dans les quatre scénarios de neutralité carbone sur le gaz de réseau ne pourront se faire sans le support de **politiques publiques structurantes avec une lisibilité claire à moyen terme** de volonté de déploiement du gaz renouvelable. Elles doivent aussi conduire à la baisse globale des consommations ainsi qu'au développement des nouveaux usages, pour le transport en particulier.

Les **engagements nationaux à long terme concernant** la production de gaz renouvelable permettent de fixer une ambition chiffrée pour son développement. Les cibles doivent être établies avec soin, en cohérence avec les évolutions nécessaires et les capacités des filières. En particulier, alors que les

quatre scénarios affichent tous un dépassement des **cibles de la PPE** actuelle en 2028 pour le biométhane, il est permis de s'interroger sur la pertinence de leur réajustement. L'objectif de 13 à 20 TWh_{PCI} injectés en 2028 devrait en effet être atteint rapidement, considérant que les capacités d'injection déjà réservées étaient d'environ 23,9 TWh_{PCI} fin décembre 2020.

La politique environnementale et énergétique française devra également prendre la forme **d'un soutien à l'innovation dans les technologies**, en particulier pour les filières non encore matures comme la pyrogazéification, la gazéification hydrothermale ou le *power-to-methane*. En ce qui concerne la gazéification, le cadre fourni par les futures **politiques de cadrage des déchets** sera également décisif pour cette filière.

Par ailleurs, des mécanismes extrabudgétaires peuvent encourager la consommation de gaz renouvelable. C'est le cas du dispositif des **garanties d'origine**, déjà en place, qui assure la traçabilité du biométhane injecté dans le réseau. La loi climat et résilience, promulguée et publiée au *Journal officiel* le 24 août 2021, prévoit également **une obligation d'incorporation** imposée aux fournisseurs de gaz.

Le développement massif de la méthanisation pose la question de son appropriation par la société, de sa cohérence avec les autres enjeux environnementaux (biodiversité, eau…), et des modèles agricoles associés. De manière à apporter des garanties sur ces différents enjeux, de s'assurer du développement d'une filière à haute performance environnementale dans toutes ses dimensions et d'en faciliter l'adhésion citoyenne, des **dispositifs de certification** comme Qualimétha®, déployé depuis 2020 en France, demandent à être systématisés, voire perfectionnés à l'aune des retours d'expérience des projets.

Les coûts de production du gaz renouvelable sont et resteront plus élevés que celui du gaz naturel (*cf.* ***section 1.2***) et l'incorporation de gaz renouvelable dans le mix gaz pourra impacter le prix facturé aux consommateurs. **La compétitivité du gaz renouvelable dépendra donc d'une baisse de ses coûts de production**, obtenue grâce à l'augmentation des rendements, la diminution des coûts d'épuration, la baisse du coût des équipements par effet d'échelle ou encore la vente des coproduits du méthane, notamment le CO_2 pour l'agriculture ou l'industrie agroalimentaire et non alimentaire. Au-delà de ces évolutions intrinsèques aux filières, **la compétitivité du gaz renouvelable sera tributaire du prix du carbone**. Sur la base d'un tarif d'achat du biométhane entre 67 EUR/MWh_{PCI} et 89 EUR/MWh_{PCI} (respectivement cibles basse et haute de la PPE en 2028) et d'un prix du gaz naturel de 37 EUR/MWh_{PCI}[18], le biométhane serait compétitif par rapport au gaz naturel à partir d'une taxe carbone valant entre 144 EUR/tCO_2eq et 252 EUR/tCO_2eq[19], à comparer avec la valeur tutélaire du carbone estimée à 775 EUR/tCO_2eq en 2050 [20].

Dans le cas où la rentabilité des projets de production de gaz renouvelable n'est pas assurée par le marché, le maintien et le développement de systèmes de tarifs d'achat est efficace. C'est actuellement le levier essentiel de la politique de soutien à la méthanisation. À l'avenir, les niveaux de **tarifs d'achat** de l'électricité issue du biogaz par rapport à ceux du biométhane auront un effet décisif sur l'orientation des projets de méthanisation vers la cogénération ou l'injection. Par ailleurs, ce mécanisme, qui permet de garantir au producteur de gaz une rémunération à un prix fixe à long terme, sera certainement fondamental pour les filières émergentes comme la gazéification et le *power-to-methane*. Dans le cas d'un système où les unités de *power-to-methane* sont associées à un méthaniseur, ces unités reposent sur les mêmes installations de purification, de comptage et d'injection. Le CO_2 utilisé pour la méthanation étant dans ce cas d'origine biologique, le biométhane et le méthane de synthèse pourraient avoir le même statut de gaz renouvelable. Un tarif d'achat identique à l'injection des deux gaz serait une solution opérante (*cf.* chapitre ***2.3.5. Hydrogène***).

Enfin, le **chiffrage des externalités positives** spécifiques de la méthanisation et de la gazéification pourrait aussi participer à justifier leur développement : traitement des déchets, production d'engrais organiques et réduction d'engrais minéraux (*cf.* chapitre ***2.2.1. Production agricole***), réduction des émissions de gaz à effet de serre, contribution à l'indépendance énergétique de la France, préservation de la biodiversité et stockage du carbone dans les sols grâce aux cultures intermédiaires ou au biochar…

18 Comme évoqué dans le cadrage de l'exercice, le cadrage de la Commission européenne est utilisé pour les hypothèses exogènes issus de l'AME 2021 de la DGEC.

19 En considérant un facteur d'émissions à la combustion de 205,2 gCO_2eq/kWh_{PCI} pour le gaz naturel et de 0 gCO_2eq/kWh_{PCI} pour le biométhane (données CITEPA).

7. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs

7.1. Limites des scénarios et autres possibles

Les premières limites des modélisations du système gazier présentées dans les paragraphes précédents sont relatives à la méthode même appliquée (*cf. section 3.1*).

Les modélisations de cette étude consistent en **un équilibrage de l'offre et de la demande au pas de temps annuel**, sans modélisation des infrastructures gazières. Ce raisonnement se tient à condition que les infrastructures, notamment celles de stockage mais aussi les importations de gaz naturel, puissent jouer leur rôle d'ajustement de la production et de la consommation en tout temps. Comme cela a été montré dans [7], les capacités de stockage actuelles (environ 120 TWh_{PCI}) et la baisse de la consommation de gaz modélisée dans tous les scénarios, en particulier sur les usages thermosensibles, rendent possible cet équilibrage.

Au-delà de la question de l'équilibrage de l'offre et de la demande, l'exercice ne propose aucune estimation des **besoins d'évolution du réseau** ni aucun chiffrage du coût de ces adaptations. Le déploiement des filières de production de gaz renouvelable impliquera une **collecte de gaz décentralisée**, en particulier dans les zones rurales, à faible consommation de gaz. Cela nécessitera le renforcement du réseau *via* la création de points de raccordement et le développement de technologies de gestion de l'appariement entre offre et demande, comme les stations de compression de rebours ou encore le stockage temporaire. Toutefois, [7] a pu montrer que dans le cas d'un système gazier alimenté à 100 % par du gaz d'origine renouvelable et avec des niveaux de demande en gaz globalement plus élevés que dans nos scénarios, ces investissements restent limités (environ 3 EUR/MWh [7]).

La transformation de la demande requiert elle aussi une évolution des réseaux gaziers. La progression du gaz dans le transport nécessitera **la mise en place d'infrastructures d'avitaillement** dont l'organisation dépendra des types d'usages : transport fluvial et maritime, flottes captives dans les villes, poids lourds… Les scénarios font l'hypothèse que le développement des stations d'avitaillement suivra la hausse de la demande en GNV.

La diminution de la demande en gaz pourrait remettre en question la **viabilité économique des réseaux de gaz** pour les gestionnaires et provoquer une augmentation des coûts d'opération et donc une hausse du prix du gaz [21]. Si la rentabilité des réseaux était remise en question, le démantèlement de certaines parties du réseau sous-utilisées pourrait être envisagé. L'évaluation de cette question nécessiterait une modélisation complexe des réseaux gaziers, qui va au-delà du cadre de la présente étude. Une telle analyse consolidée sur le seuil de rentabilité des réseaux n'existe pas à notre connaissance. Par conséquent, les scénarios supposent que tous les réseaux existants seront maintenus. Dans les scénarios 3 et 4, le déploiement de pompes à chaleur hybrides, permettant de maintenir le nombre de raccordements au réseau, devrait limiter les situations critiques pour les gestionnaires de réseau de gaz.

Une autre limite concerne certaines voies de décarbonation du gaz qui n'ont pas été considérées. La **gazéification hydrothermale** en particulier, car ce procédé est encore trop peu mature et les retours d'expériences trop peu nombreux pour pouvoir être intégré dans des proportions significatives d'ici trente ans.

Par ailleurs, pour le ***power-to-methane***, notre étude a fait l'hypothèse d'un fonctionnement uniquement en couplage avec des unités de méthanisation. D'autres **sources de CO_2**, renouvelables et fossiles, pourraient être envisagées : épuration de syngas issu de gazéification de biomasse, captage sur fumées de chaufferies biomasse, captage sur bioraffineries, décarbonatation du calcaire lors de la fabrication du clinker… (*cf.* chapitre *2.4.3 Puits de carbone*). Ces sources ont été analysées en détail dans [7], en fonction de leur adaptation au captage, de leur proximité au réseau de gaz, de leur saisonnalité et de leur situation géographique. Toutefois, nous n'avons retenu que le CO_2 issu de l'épuration du biométhane puisqu'il représente un approvisionnement à coût

nul ou quasi nul [7] et afin de profiter de synergies pour l'injection dans le réseau du méthane produit par méthanisation et par *power-to-methane*. Par ailleurs, la prise en compte d'autres approvisionnements en CO_2 pour le *power-to-methane* ne devrait pas modifier les volumes de méthane de synthèse dégagés dans chaque scénario. En effet, le facteur limitant est davantage la demande en électricité associée à la production d'hydrogène que celle en CO_2.

La question des **importations de gaz renouvelable et décarboné** est complexe, pour les raisons évoquées lors de la description des scénarios : incertitudes sur les capacités d'exportation des pays étrangers, incertitudes sur les coûts du gaz importé, incertitudes sur l'évolution des relations internationales et de la géopolitique, etc. Par ailleurs, les enjeux de la production de gaz renouvelable présentés pour la France dans ce chapitre sont valables aussi pour les pays étrangers : coûts de production élevés, arbitrages sur les usages de la biomasse avec, en toile de fond, préservation de la biodiversité et des puits carbone dans le cas de la méthanisation et de la pyrogazéification, approvisionnement en électricité et en CO_2 dans le cas du *power-to-methane*. Dans le cas où il serait nécessaire d'avoir recours à de telles importations, ces enjeux ne seraient pas maîtrisés et pourraient simplement déplacer des émissions hors de nos frontières. Le choix de ne pas importer de gaz renouvelable dans S1, S2 et S3 est donc un choix de principe mais qui pourrait être remis en question. *A contrario*, S4 fait le pari de ces importations pour maintenir une demande en gaz élevée.

Enfin, la modélisation du système gazier s'est faite à l'échelle du territoire national dans son ensemble. Cette échelle macroscopique empêche *de facto* la prise en compte quantifiée de **spécificités territoriales**. Or, ces spécificités peuvent être stratégiques à l'échelle des régions, quand bien même leur influence ne serait que marginale sur le volume total produit sur le plan national. Par exemple, des points de congestion du réseau électrique pourraient apparaître localement avec le développement des énergies renouvelables. En fonction des contextes et des besoins locaux, la mise en place d'électrolyseurs, y compris pour du ***power-to-methane***, pourrait constituer une solution de gestion pertinente de ces excédents. Les Hauts-de-France, avec la question des gaz sidérurgiques et des gaz de mine, représentent un exemple local spécifique. La centrale à cycle combiné DK6 située à Dunkerque est aujourd'hui alimentée par les **gaz sidérurgiques** d'ArcelorMittal, ainsi que par du gaz naturel. En fonction des hypothèses d'évolution de la production d'acier dans les scénarios, il conviendrait de réévaluer l'approvisionnement de la centrale électrique. Cela pourrait affecter les volumes de gaz de réseau nécessaires à son alimentation, *a fortiori* dans S2 qui projette la disparition des hauts fourneaux (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). Cette question n'a cependant pas été explicitement traitée dans nos modélisations. En effet, les volumes de gaz de réseau utilisés pour la production d'électricité résultent de l'optimisation technico-économique du système électrique à l'échelle nationale. Enfin, les modélisations présentées dans cette étude n'incluent pas les **gaz de mine**, qui ne représentent aujourd'hui que 100 GWh et dont la production est amenée à disparaître. Ils pourraient toutefois jouer un rôle transitoire d'ici 2030 comme l'estime une étude sur la région Hauts-de-France, qui scénarise une production allant jusqu'à 600, voire 700 GWh dans les années 2020-2030 [22]. En 2050, cette étude présente toutefois une production négligeable inférieure à 100 GWh.

7.2. Robustesse des scénarios

La première source d'incertitude des scénarios d'offre en gaz de réseau jusqu'en 2050 concerne les **évolutions techniques des filières de production**. En ce qui concerne la méthanisation, la filière existe depuis une vingtaine d'années pour la cogénération et depuis environ dix ans pour l'injection de biométhane. Les incertitudes techniques, en particulier sur les rendements de conversion, sont donc faibles, d'autant plus que les hypothèses d'optimisation énergétique à l'horizon 2050 sont prudentes et la technologie, simple. En revanche, la pyrogazéification et le *power-to-methane* n'existent pas aujourd'hui à l'échelle industrielle en France. Les hypothèses de rendement énergétique, qui peuvent varier notamment en fonction des intrants pour la pyrogazéification (biomasse ligneuse propre ou CSR par exemple), ont été établies d'après les retours d'expérience d'un faible nombre de pilotes et de démonstrateurs, en France et dans le reste du monde. Pour ces deux filières, des précautions s'imposent donc au sujet des hypothèses de rendement et, *in fine*, des volumes globaux de gaz produits.

La deuxième source d'incertitude sur les volumes de gaz produits provient de **l'estimation des ressources primaires disponibles**. Pour la méthanisation et la pyrogazéification, les ressources en biomasse seront affectées par le **changement climatique**. Cet effet a été pris en compte par des rendements prudents pour les cultures et par l'hypothèse d'un climat aggravé pour la forêt, mais ces modélisations ont bien sûr leurs limites. Pour la forêt en particulier, la modélisation des ressources tient compte des effets directs du changement climatique (modification des précipitations et températures) mais les effets indirects induits par une augmentation des perturbations extrêmes (incendies, tempêtes, crises sanitaires) ne sont pas intégrés. Pour la pyrogazéification, qui se tourne en priorité vers la valorisation de déchets bois et CSR, les intrants disponibles dépen-

dront aussi grandement des **politiques de gestion de déchets mises en œuvre**. Ainsi, S1 et S2 reposent sur une consommation centrée sur le nécessaire et sur d'importantes politiques de prévention, qui limitent le gisement des déchets disponibles pour la pyrogazéification. À l'inverse, la quantité de déchets dans S3 est plus importante. La gestion des déchets est davantage tournée vers la production d'énergie, parfois au détriment de la valorisation matière, précisément pour s'adapter à la demande et ainsi produire 47 TWh_{PCI} de méthane de synthèse en 2050 à partir de CSR. Par ailleurs pour cette technologie, il y a risque de **concurrence d'usage** avec d'autres filières de valorisation de la biomasse ligneuse et des CSR et la ressource disponible dépendra de l'évolution de ces autres filières. Les arbitrages avec la combustion et les biocarburants avancés, notamment, sont complexes. Les scénarios ne proposent que quatre équilibres possibles, mais une infinité d'autres pourraient être imaginés.

La perception par la population des technologies de production de gaz n'a pas été spécifiquement étudiée et pourrait largement remettre en question les volumes de gaz produits. Cette question est de première importance pour la méthanisation (comme pour toute énergie renouvelable en développement), qui représente le pilier de la décarbonation du gaz dans nos scénarios et qui se matérialiserait par près de 7 000 unités en France en 2050 dans notre étude. Aujourd'hui en France, dans toutes les régions, le développement de la méthanisation se heurte à ces questions d'appropriation sociale et de nombreux projets sont bloqués. Toutefois, ces risques sont limités par le fait qu'aucun scénario n'envisage de développement massif de projets de très grande taille, plus susceptibles d'être critiqués par les riverains. Cet aspect sociologique est cependant abordé lors du travail spécifique avec un groupe de citoyens questionnés sur nos scénarios (se reporter au feuilleton publié en 2022 sur les modes de vie).

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **SDES**, *Chiffres clés de l'énergie, édition 2020,* 2020.

[2] **CITEPA**, *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten,* 2020.

[3] **IEA**, *ETP Clean Energy Technology Guide, IEA, Paris* (https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide), 2020.

[4] **IEA**, *Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation,* 2020.

[5] **IEA**, *World Energy Outlook 2020,* 2020.

[6] **CRE**, *Le Verdissement du gaz,* 2019.

[7] **ADEME, GRDF, GRTgaz**, *Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?,* 2018.

[8] **CRE**, *Les Interconnexions électriques et gazières,* 2020.

[9] **SDES**, *Bilan énergétique de la France pour 2019,* 2021.

[10] **Portail Open data de l'AFGNV** (https://www.afgnv.org/).

[11] **Plan de programmation de l'énergie**, données 2016.

[12] **CRE**, *Les Interconnexions électriques et gazières en France – Un outil au service de la construction d'un marché européen intégré,* 2016.

[13] **ADEME *et al.***, *Évaluation du potentiel de production de biométhane à partir des boues issues des stations d'épuration des eaux usées urbaines,* 2014.

[14] **ADEME, Enerdata et Énergies Demain**, *Actualisation du scénario énergie-climat – ADEME 2035-2050*, 2017.

[15] **ENEA, INRIA et ADEME**, *Évaluation du gisement potentiel de ressources algales pour l'énergie et la chimie en France à horizon 2030,* 2014.

[16] **ADEME, Solagro, APESA, AGROBIOMASSE**, *Suivi technique, économique et social de 10 installations de méthanisation*, 2020, 76 pages.

[17] **IRENA**, *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

[18] **ADEME, GRDF, GRTgaz**, *Étude sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire,* 2014.

[19] **ADEME, RDC Environment**, *Impacts environnementaux de scénarios de valorisation énergétique des déchets des activités économiques*, 2019, 226 pages.

[20] **Alain Quinet**, *La Valeur de l'action pour le climat – Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques,* France Stratégie, 2019, 190 pages.

[21] **Ines Bouacida et Nicolas Berghmans**, *Neutralité carbone en Europe : défis futurs pour les infrastructures de gaz*, IDDRI, 2021.

[22] **ADEME, Éric Vidalenc, ENERDATA, Nicolas Mairet, Laura Sudries, Énergies Demain, Vincent Briand**, *Scénarios d'actualisation du master plan pour la troisième révolution industrielle en Hauts-de-France,* 2018.

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2015	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
MÉTHANISATION – tailles des installations de méthanisation [Nm³/h]	~ 150 Nm³/h globalement	En augmentation modérée en moyenne (~ 250 Nm³/h pour les unités à la ferme, 350 à 400 Nm³/h pour les installations centralisées). Une dizaine d'installations atteignent des débits d'environ 2000 Nm³/h	Modeste (~ 150 Nm³/h pour les unités à la ferme, 250 Nm³/h pour les installations centralisées). Pas de très grande installation	Modeste (~ 150 Nm³/h pour les unités à la ferme, 250 Nm³/h pour les installations centralisées). Pas de très grande installation	En augmentation modérée (~ 250 Nm³/h pour les unités à la ferme, 350 à 400 Nm³/h pour les installations centralisées). Pas de très grande installation	En augmentation modérée en moyenne (~ 250 Nm³/h pour les unités à la ferme, 350 à 400 Nm³/h pour les installations centralisées). Environ 40 installations de 2 000 Nm³/h pour du BECCS
MÉTHANISATION – rendement électrique cogénération méthanisation (électricité produite/EP PCI) [%]	~ 35	40	40	40	40	40
MÉTHANISATION – rendement chaleur cogénération méthanisation (EP PCI)	Jusqu'à 50 %, hors valorisation	20 % valorisés	20 % valorisés	20 % valorisés	20 % valorisés	20 % valorisés
MÉTHANISATION – rendement méthanisation (méthane injectable PCI/EP PCI) [%]	~ 85	90	90	90	90	90
MÉTHANISATION – méthanisation de cultures dédiées	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui
MÉTHANISATION – méthanisation de microalgues	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui
GAZÉIFICATION – tailles des installations de gazéification et fonctionnement	Pas de gazéification	Pas de gazéification	Pas de gazéification	3 à 20 MW avec une moyenne de 11,1 MW (gaz) à 8 000 h/an	3 à 20 MW avec une moyenne de 11,1 MW (gaz) à 8 000 h/an	27 MW à 8 000 h/an
GAZÉIFICATION – rendement pyrogazéification (méthane injectable PCI/EP PCI) [%]	S.O.	S.O.	S.O.	63	63	63
POWER-TO-METHANE – développement du *power-to-methane*	Non	Non	Oui, en couplage avec des installations de méthanisation avec des électrolyseurs de quelques MW et une durée de fonctionnement de 3 000 h/an	Oui, en couplage avec des installations de méthanisation avec des électrolyseurs de quelques MW et une durée de fonctionnement de 3 000 h/an	Oui, en couplage avec des installations de méthanisation avec des électrolyseurs de quelques MW et une durée de fonctionnement de 3 000 h/an	Non
POWER-TO-METHANE – rendement *power-to-methane* (méthane injectable PCI/élec) [%]	S.O.	S.O.	61	61	61	S.O.
BECCS – BECCS sur grandes installations de méthanisation et gazéification	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
RÉSEAUX – pertes sur les réseaux [%]	~ 1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
BÂTIMENT – nombre de logements raccordés au réseau de gaz [Millions de logements]	9,9	9,9	2,9	4,6	9,2	9,9
BÂTIMENT – développement des pompes à chaleur hybrides dans le bâtiment	Nul	Modéré	Nul	Très faible	Très important	Important
PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ – rendement centrales CCGT (PCI) [%]	~ 60	60	60	60	60	60

2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux

1. Synthèse de la problématique et des enjeux pour la chaleur et le froid
408

2. Rétrospective des tendances des réseaux de chaleur et de froid
411

3. Description de l'état actuel des réseaux de chaleur et de froid
415

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios
417

5. Stratégies pour le secteur, selon chaque scénario
419

6. Enseignements pour le secteur de la chaleur et du froid, propositions de politiques et mesures
437

7. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs
443

8. Références bibliographiques
444

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur
445

1. Synthèse de la problématique et des enjeux pour la chaleur et le froid

1.1. Importance de la transformation du secteur de la chaleur et du froid

Les principaux enjeux de transition écologique du secteur de la chaleur et du froid portent sur :

- **l'élimination de l'utilisation des combustibles fossiles** et par voie de conséquence le renforcement du développement des réseaux de chaleur et de froid, ainsi que le développement de la production de chaleur renouvelable dans le bâtiment ;
- **l'écoconception des installations, équipements et systèmes** dans l'objectif de minimiser l'utilisation des matières, de faciliter la réparabilité, de renforcer le réemploi et le recyclage, de minimiser les déchets en fin de vie et d'améliorer les performances (énergétiques, durabilité, etc.) ainsi que la maîtrise des émissions de GES en phase d'exploitation et de fin de vie, notamment pour les pompes à chaleur (fluide frigorigène) ;
- **l'appropriation sociale des installations**, équipements et systèmes basée sur un coût de l'énergie produite accessible et dans certains cas, notamment pour les réseaux, l'implication des collectivités ou des citoyens dans la gouvernance des projets.

En France, la consommation finale énergétique des secteurs tertiaire, résidentiel et industriel est principalement destinée à l'usage de la chaleur et du froid. Plus particulièrement, le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS) et la climatisation couvrent en 2019 plus de 60 % de la consommation finale du secteur tertiaire (soit 162 TWh cumulés sur un total de 261 TWh), et près de 80 % de la consommation finale du secteur résidentiel (soit 361 TWh cumulés sur un total de 463 TWh). Dans l'industrie, on estime que plus de 30 % de la consommation finale du secteur industriel est destinée à l'usage de la chaleur sur une consommation finale énergétique totale de 320 TWh.

Les énergies fossiles sont encore trop présentes dans la consommation finale énergétique des secteurs tertiaire, résidentiel et industriel. À ce jour, 60 % des besoins en chauffage et en ECS des secteurs résidentiel et tertiaire sont couverts par les réseaux de gaz et le fioul, notamment pour le chauffage des ménages et des bâtiments tertiaires. Dans le secteur industriel, 51 % des besoins énergétiques sont couverts par les énergies fossiles tous usages confondus. Dans ce contexte, les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) produites de manière décentralisée progressent, modestement dans les secteurs tertiaire et industriel et de manière plus soutenue dans le secteur résidentiel, portées par divers usages distribués (unités de petite taille) dont le chauffage au bois individuel. Enfin, la consommation de chaleur en provenance des réseaux croît assez lentement.

En matière de climatisation, la dépendance aux énergies fossiles est moins forte car ces besoins sont très majoritairement assurés par des pompes à chaleur (PAC) électriques. En 2020, la consommation des climatiseurs du secteur résidentiel est évaluée à 4,9 TWh, dont 75 % est issue des maisons individuelles et à 10,6 TWh pour le secteur tertiaire, dont 75 % provient des bureaux et commerces. À titre de comparaison, les réseaux de froid (25 recensés sur le territoire national) délivrent autour de 1 TWh de froid.

> DES BESOINS DE CHALEUR ET FROID ENCORE MAJORITAIREMENT SATISFAITS PAR DES ÉQUIPEMENTS HORS RÉSEAUX ET UN POTENTIEL DE DÉVELOPPEMENT DES RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID ENCORE SOUS-EXPLOITÉ

Environ 95 % des besoins de chaleur et de froid, tous secteurs confondus, sont satisfaits en s'appuyant sur des moyens de production hors réseaux (de l'ordre de 475 TWh en 2019). Les 5 % restants sont satisfaits grâce aux réseaux de chaleur et de froid (environ 26 TWh en 2019), principalement déployés dans les zones urbaines.

La réduction de la part des combustibles fossiles dans les besoins de chaleur et de froid passera donc par le levier de la chaleur renouvelable et de récupération livrée par les réseaux, qu'il s'agisse des secteurs résidentiel et tertiaire ou de l'industrie. Le verdissement du mix de production de chaleur, en plus de la baisse

des consommations énergétiques, permettra de réduire durablement les émissions de CO_2 de ces secteurs.

DES OBJECTIFS AMBITIEUX DE CHALEUR RENOUVELABLE À COURT TERME DIFFICILEMENT ATTEIGNABLES POUR LES RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID

En 2019, les 798 réseaux de chaleur français ont livré une quantité totale de chaleur de 25,6 TWh principalement pour alimenter des bâtiments résidentiels et tertiaires (14 TWh au secteur résidentiels et 8,5 TWh au secteur tertiaire [1] soit 90 % du total).

Plus de 400 000 PAC aérothermiques vendues chaque année.

Avec 15 TWh d'EnR&R livrés en 2019, la France n'est pas totalement en ligne avec les objectifs de la dernière programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), qui porte à 24,4 TWh en 2023 et entre 31 et 36 TWh en 2028 la livraison de chaleur renouvelable par les réseaux. L'objectif de la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), qui est de multiplier par cinq la chaleur et le froid renouvelables livrés par les réseaux entre 2012 et 2030, soit 39 TWh, paraît également ambitieux au vue de la tendance des dernières années. Par ailleurs, l'ADEME a estimé le « potentiel haut » de livraison de chaleur et de froid, éventuellement accessible sur le long terme, à environ 82,2 TWh/an [2]. Cela montre bien le potentiel de croissance des réseaux de chaleur et de froid.

En ce qui concerne les réseaux de froid, les objectifs de la PPE visent à distribuer entre 1,4 TWh et 2,7 TWh à l'horizon 2028.

LE RÉSEAU DE CHALEUR ET DE FROID, UN OUTIL EFFICACE POUR VALORISER DES MOYENS DE PRODUCTION D'ENR&R DANS LES CENTRES URBAINS

Les réseaux de chaleur et de froid permettent d'optimiser le dimensionnement et l'utilisation de moyens de production centralisés et locaux présentant une efficacité énergétique et économique intéressante pour la collectivité et les usagers.

Ainsi, **ces réseaux sont un moyen pertinent de distribuer des énergies renouvelables et de récupération qui ne pourraient pas être transportées autrement jusque dans les centres urbains denses.** Cela concerne notamment la biomasse (par l'intermédiaire de chaudières à bois dotées de filtres pour limiter les émissions de polluants atmosphériques), la géothermie (notamment sur aquifères profonds), le solaire thermique, ainsi que les énergies de récupération, essentiellement la chaleur issue des usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM).

Les réseaux de froid utilisent également le potentiel géothermique (*via* le *free cooling*) et la chaleur de récupération (selon le principe de l'absorption).

1.2. Diagnostic des freins et des barrières à la chaleur et au froid renouvelables

Bien que plusieurs solutions de production de chaleur renouvelable hors réseaux (PAC, géothermie, solaire thermique) soient efficaces, fiables et peuvent s'appuyer sur des installateurs formés et compétents, leur coût en capital [3] est souvent nettement supérieur à celui des solutions fossiles. Ainsi, leur généralisation dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel est actuellement fortement contrainte faute d'un accès facile au financement et d'un retour sur investissement rapide.

LES RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID PÂTISSENT D'UNE VISIBILITÉ PLUS FAIBLE QUE LES AUTRES RÉSEAUX ET DE LA CONCURRENCE DES SOLUTIONS DÉCENTRALISÉES

Malgré le fait qu'ils permettent de valoriser d'importantes quantités d'EnR&R, les réseaux de chaleur et de froid sont peu connus et peu visibles du grand public. Le processus de création d'un réseau prend plusieurs années, nécessite une forte implication des collectivités et les choix de gouvernance peuvent être complexes pour préciser les compétences juridique, économique et technique. Bien que les réseaux de chaleur permettent de livrer une chaleur historiquement bon marché (en moyenne à 75 EUR/MWh) et de limiter la précarité énergétique, la comparaison économique systématique des réseaux de gaz avec les réseaux de chaleur est peu à l'avantage de ces derniers depuis quelques années, du fait d'un prix très faible du gaz et d'un gel de la contribution climat-énergie. Par ailleurs, dans certains secteurs d'usage, les solutions hors réseaux sont souvent préférées du fait d'une plus grande rapidité lors de la prise de décision et d'une plus grande souplesse dans la mise en œuvre et l'exploitation des systèmes.

Les réseaux de froid pâtissent quant à eux de la complexité du raccordement par rapport à des solutions autonomes de type PAC. Le rythme de développement de ces dernières est d'ailleurs sans commune mesure avec celui des réseaux de froid : chaque année, il se vend plus de 400 000 PAC aérothermiques dont plusieurs dizaines de milliers réversibles [4]. À titre de comparaison, à ce jour, seuls environ 1 340 bâtiments sont raccordés à des réseaux de froid [5].

1.3. Des arbitrages nécessaires en faveur de la chaleur et du froid renouvelables

LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE NÉCESSITE LA MISE EN PLACE DE POLITIQUES PUBLIQUES FORTES EN FAVEUR DE LA CHALEUR ET DU FROID RENOUVELABLES, AINSI QUE DES RÉSEAUX DE CHALEUR

Dans le contexte de baisse globale de la demande de chaleur, les pouvoirs publics et la filière doivent accroître l'attrait à la fois des solutions EnR&R distribuées et décentralisées et des réseaux de chaleur pour les secteurs tertiaire, résidentiel et industriel. L'un des sujets prioritaires sur lequel agir est la compétitivité économique des solutions de chaleur et froid renouvelables (y compris réseaux) par rapport aux solutions fossiles. D'autres enjeux à arbitrer portent sur la faisabilité de la mobilisation des gisements d'énergies renouvelables et les conditions de réalisation des réseaux de chaleur dans les territoires. En effet, ils rencontrent de véritables freins à la création dans les zones urbaines denses. Le prix du foncier dans les villes a fortement augmenté dans les dernières années et il est de plus en plus difficile pour les porteurs de projet de trouver des terrains pour installer des moyens de production renouvelables (chaufferies bois, forages géothermiques…).

LA DEMANDE DE FROID VA PROGRESSER DE MANIÈRE SIGNIFICATIVE AU COURS DES PROCHAINES DÉCENNIES

Les travaux de Météo-France montrent que les vagues de chaleur risquent non seulement d'atteindre des températures plus hautes, mais surtout de durer bien plus longtemps. Selon l'OCDE [5], la demande mondiale de froid de confort tendrait vers un triplement entre 2020 et 2050. Dans ce contexte, la demande nationale de froid en France, sans adaptation majeure, connaîtrait inévitablement une progression continue et importante. La réglementation thermique et plus globalement l'évolution des bâtiments vers davantage d'efficacité et de sobriété peuvent cependant limiter, voire annuler l'augmentation des besoins de froid, comme le montrent les résultats détaillés dans les chapitres ci-après.

Enfin, les réseaux de froid partent d'une situation beaucoup plus modeste et ne disposent pas du même potentiel de développement que les réseaux de chaleur. Ils nécessitent une densité urbaine forte pour trouver un modèle d'affaires équilibré, ce qui limite leurs perspectives à l'échelle du pays.

2. Rétrospective des tendances des réseaux de chaleur et de froid

2.1. Évolution des réseaux de chaleur et de froid

En France, le développement des réseaux de chaleur et de froid a débuté dans les villes les plus urbanisées dès les années 1930, avant de s'accélérer suite aux chocs pétroliers de 1973 et 1979 avec en ligne de mire l'objectif de réduire notre dépendance aux importations d'énergies fossiles.

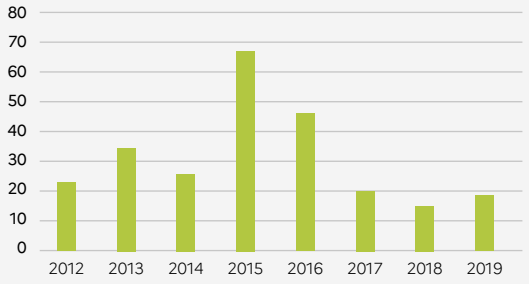
En 2020, on compte 25 réseaux de froid en France.

Les réseaux de chaleur des premières générations, créés entre 1880 et 1930, étaient relativement courts et acheminaient de la chaleur essentiellement d'origine fossile, *via* des canalisations en béton. À partir de la fin des années 1920, des réseaux de chaleur sont apparus dans les centres urbains de quelques grandes villes : Paris, Chambéry, Villeurbanne, Grenoble et Strasbourg. Il s'agit alors de réseaux dits de 2e génération, fonctionnant à eau sous pression avec des températures supérieures à 100 °C. Entre les années 1950 et 1970, décennies caractérisées par une forte urbanisation, les réseaux se déploient en même temps que les villes et accompagnent la construction des nouvelles zones d'habitation, généralement en utilisant des moyens de production au fioul ou au charbon. À partir des années 1970, de nouveaux réseaux de chaleur se créent et d'anciens réseaux modifient leur mix en faisant appel à la géothermie profonde et à la chaleur issue de l'incinération des ordures ménagères, dans le but de s'affranchir des combustibles fossiles importés. Il s'agit alors de réseaux dits de 3e génération, fonctionnant avec des tubes préisolés et disposant d'un suivi numérique à partir de la fin des années 1970. Les températures de fonctionnement passent en dessous des 100 °C ce qui accroît la capacité de décarbonation des réseaux. Dans les années 1990, des réseaux de taille modeste sont mis en place dans des territoires ruraux, transportant des quantités de chaleur assez faibles provenant essentiellement de chaudières biomasse. C'est dans les années 2010, sous l'impulsion des lois Grenelle, que les réseaux de chaleur et de froid vont connaître un renouveau en zone urbaine, portés par des orientations nationales et européennes favorables, notamment avec l'apparition du Fonds Chaleur. On parle à présent de réseaux dits de 4e génération, à faible demande énergétique, de type *smartgrid* (réseaux intelligents) avec plusieurs sources énergétiques et une optimisation de l'adéquation offre/demande.

Les réseaux de froid ont une histoire plus récente (premier réseau français en 1967, à Paris). Ils reposent à plus de 90 % sur la technologie dite des groupes froids à compression, consistant à prélever de la chaleur dans un milieu à refroidir – la source froide – puis à la transférer vers un milieu extérieur (eau ou air extérieur) qui constitue la source chaude. Le transfert d'énergie est réalisé par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène qui transite par un compresseur réalisant le transfert entre les deux sources. En 2008, on comptait moins de 10 réseaux de froid. Ces derniers ont ensuite connu une progression plus homogène pour atteindre 25 réseaux en 2020.

Comme le montre le *Graphique 1*, le rythme de création des réseaux de chaleur a été relativement stable lors de la dernière décennie, aux alentours de 15 à 30 par an (les années 2015 et 2016 présentent une spécificité car les petits réseaux de chaleur de puissance < 3,5 MW ont été intégrés au recensement à partir de 2015).

Graphique 1 *Nombre de créations de réseaux de chaleur*



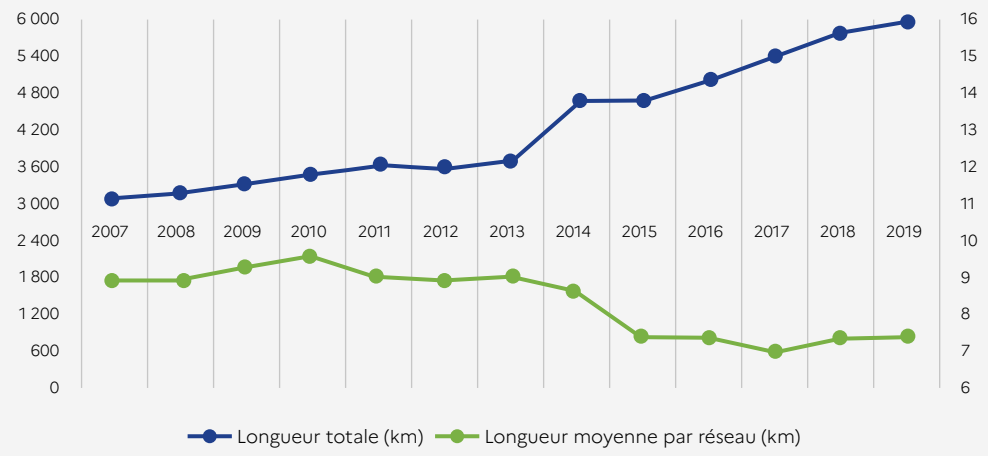
Source : FEDENE, enquête SNCU.

LA LONGUEUR DESSERVIE PAR LES RÉSEAUX DE CHALEUR ATTEINT 5 964 KM EN 2019, AVEC UN TOTAL DE PLUS DE 40 000 BÂTIMENTS RACCORDÉS

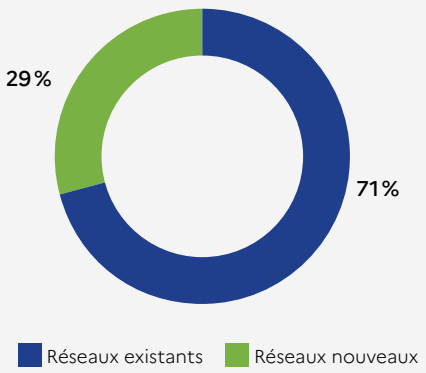
La longueur cumulée des réseaux de chaleur a connu une forte augmentation à partir de 2013, poussée, dans un premier temps, par la création de nouveaux réseaux dans des villes de taille moyenne (ce qui explique une baisse de la longueur moyenne des réseaux entre 2013 et 2015), puis accélérée, dans un deuxième temps, par l'extension des réseaux existants dans les années qui suivent.

Les explications sont relativement similaires quand il s'agit d'analyser le nombre de bâtiments raccordés aux réseaux de chaleur sur la période 2007-2019, qui ont commencé à fortement croître à partir de 2013-2014 avec la mise en service des nouveaux réseaux et extensions financés par le Fonds Chaleur. En 2019, on compte ainsi 40 993 bâtiments raccordés, soit 2,37 millions d'équivalents logements.

Graphique 2a *Évolution de la longueur des réseaux entre 2007 et 2019*



Graphique 2b *Détail des linéaires supplémentaires en 2019*



Source : FEDENE, enquête SNCU.

2.2. Évolution du mix énergétique des réseaux de chaleur et de froid

UN CONTENU CO_2 DES RÉSEAUX DE CHALEUR EN CONSTANTE BAISSE DEPUIS BIENTÔT 10 ANS

Avec une production d'énergies renouvelables et de récupération croissante depuis plus d'une décennie, les réseaux de chaleur sont passés d'un contenu moyen de 210 gCO_2/kWh au début des années 2000 à 107 gCO_2/kWh en 2019[1] *(Graphique 3)*.

Cette diminution positionne aujourd'hui les réseaux comme un moyen crédible pour décarboner les consommations liées au chauffage, à l'eau chaude sanitaire et à la climatisation, juste derrière la chaudière à bois (13 gCO_2/kWh) et devant le radiateur électrique et les chaudières à gaz et fioul (respectivement 180, 234 et 300 gCO_2/kWh)[2]. Le contenu CO_2 des réseaux de froid est de l'ordre de 10 gCO_2/kWh en énergie finale.

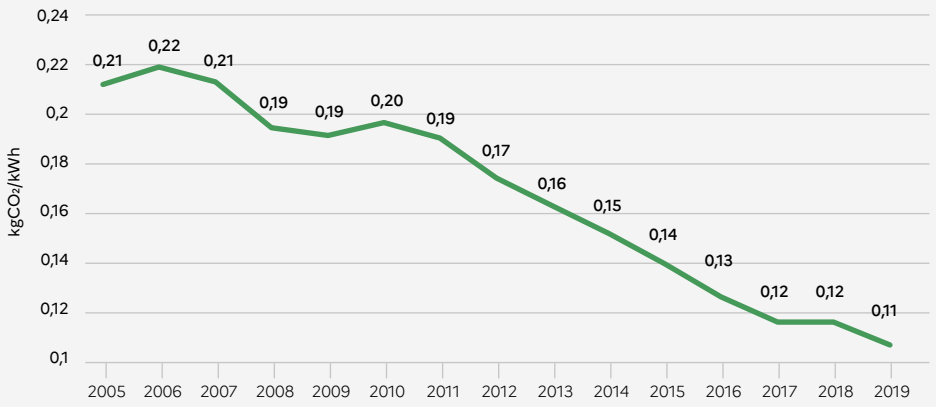
Si les énergies fossiles continuent de représenter une part non négligeable de l'approvisionnement des réseaux (dont 35,2 % à partir de gaz), la part et le volume des sources EnR&R ne cessent de progresser. Ainsi, comme le réprésente le *Graphique 4*, les volumes de production EnR&R ont doublé depuis 2009, notamment sous l'impulsion du Fonds Chaleur, passant de 31 % d'EnR&R dans le mix total en 2009 à 59,4 % en 2019. Les chaudières biomasse ont connu la plus forte hausse des volumes produits durant la période 2009-2019 (passant de 1 TWh en 2009 à 6,8 TWh en 2019), suivies des productions géothermiques (0,8 TWh en 2009 à 1,8 TWh en 2019), puis la chaleur industrielle (0,3 TWh en 2009 à 0,7 TWh en 2019). Sur la même période, les volumes de production issus du gaz ont oscillé entre 11 et 14 TWh, tandis que ceux issus de fioul et de charbon ont quasiment disparu[3].

Pour les réseaux de froid, la technologie des groupes à compression présente une performance significative, puisque le ratio entre la quantité de froid produite et la quantité d'électricité consommée atteint, en moyenne sur l'ensemble des réseaux de froid français, la valeur de 4,7 [6]. Cette performance, couplée au faible contenu CO_2 de l'électricité, permet aux réseaux de froid de présenter un faible contenu CO_2, de l'ordre de 10 gCO_2/kWh.

À titre de comparaison, on peut utiliser le coefficient d'efficacité frigorifique des équipements décentralisés, qui représente l'efficacité énergétique d'un appareil de climatisation et correspond à la somme d'énergie frigorifique produite sur la saison divisée par la somme d'énergie consommée sur cette même période (pour une température extérieure et une température de consigne données). Dans le modèle utilisé dans ces travaux et pour 30 °C de température extérieure et 27 °C de consigne, ce coefficient vaut en moyenne 3,2 en 2020 pour les solutions décentralisées de type « climatiseur » ou « pompe à chaleur » et 5 pour les PAC géothermiques.

À l'horizon 2050, les valeurs entre ces différentes technologies s'homogénéisent davantage : le coefficient des solutions décentralisées atteint 5,7 en moyenne, celui des réseaux de froid 6 et celui des PAC géothermiques 7. À noter que pour une même température de consigne mais avec 40 °C de température extérieure, les performances de ce coefficient baissent d'environ 40 %.

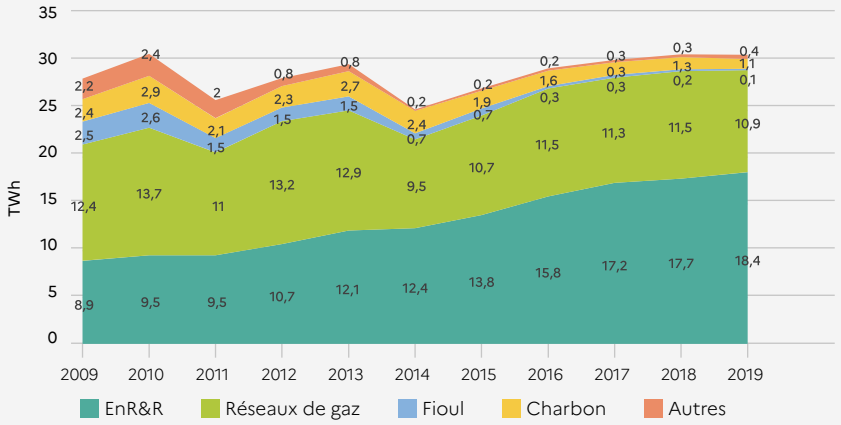
Graphique 3 Évolution du contenu CO_2 des réseaux de chaleur entre 2005 et 2019



Source : FEDENE, enquête SNCU.

1 Hors ACV.
2 Source : arrêté DPE du 15 septembre 2006.
3 Les volumes de production des réseaux de chaleur sont supérieurs aux livraisons en sous-station du fait des pertes de chaleur accumulées sur les réseaux, de l'ordre de 15 % en moyenne par an.

Graphique 4 *Évolution du mix énergétique des réseaux de chaleur entre 2009 et 2019*



Source : FEDENE, enquête SNCU.

2.3. Évolution des livraisons des réseaux de chaleur et de froid

DES LIVRAISONS DE CHALEUR STABLES DEPUIS PLUSIEURS ANNÉES MALGRÉ LA DENSIFICATION, L'EXTENSION ET LA CRÉATION DES RÉSEAUX

Les livraisons de chaleur chez les abonnés ont été relativement stables durant la dernière décennie, oscillant entre 20,5 et 25,7 TWh depuis 2012. Cela s'explique par une croissance du nombre de bâtiments raccordés sur les dernières années (+ 22 % entre 2015 et 2019) qui s'est trouvée en partie compensée par l'efficacité énergétique due au rythme de rénovation des bâtiments déjà raccordés (- 25 % entre 2012 et 2019), ainsi que par le raccordement de bâtiments neufs dont la consommation faible diminue la moyenne globale.

Les réseaux de froid délivrent depuis dix ans entre 0,9 et 1 TWh de froid, bien que le nombre de réseaux soit passé de 14 à 25. La part prépondérante du réseau parisien historique, délivrant plus de 400 GWh de froid annuellement, et la taille plus modeste des autres réseaux expliquent en partie cette constance.

3. Description de l'état actuel des réseaux de chaleur et de froid

3.1. La situation en 2019 des réseaux de chaleur et de froid

TROIS RÉGIONS EN FRANCE CONCENTRENT UNE GRANDE PARTIE DES RÉSEAUX DE CHALEUR ET *IN FINE* DES LIVRAISONS

L'Île-de-France est la région qui concentre le plus de livraison annuelle de chaleur (11,4 TWh), suivie par l'Auvergne-Rhône-Alpes et le Grand Est (respectivement 3,2 TWh et 3 TWh). Cette grande disparité entre les régions s'explique notamment par l'histoire des réseaux ainsi que par le potentiel géothermique profond exploité depuis plusieurs décennies en Île-de-France (1,7 TWh en 2019) et la présence d'UIOM qui y sont largement exploitées (4 TWh). La densité énergétique des territoires est également importante, puisque les villes denses sont plus favorables au développement des réseaux de chaleur.

Depuis 2005, date du premier recensement des réseaux de chaleur, leur nombre en France est passé de 380 à 798 en 2019. Auvergne-Rhône-Alpes est aujourd'hui la région qui concentre le plus de réseaux (162), suivi du Grand Est et de l'Île-de-France (respectivement 114 et 113).

Près de 80 % des livraisons totales de froid par les réseaux (1 TWh) sont concentrés sur la douzaine de réseaux franciliens. La moitié sud du pays regroupe le reste des réseaux (sauf un situé en région Grand Est).

3.2. Les tendances émergentes

Les filières de production habituelles (bois, géothermie, chaleur fatale) continuent de se développer. Toutefois, sous l'impulsion du Fonds Chaleur opéré par l'ADEME[4], les réseaux de type boucles d'eau tempérées trouvent un équilibre économique, ainsi que les grandes installations solaires thermiques notamment lorsqu'elles sont couplées aux réseaux de chaleur.

Les boucles d'eau tempérées fonctionnent avec les mêmes composants qu'un réseau de chaleur classique mais utilisent une eau à basse température (entre 10 °C et 25 °C) issue de sources variées (aquifères, fleuves, lacs, mers, eaux usées) qui présentent l'avantage d'une large disponibilité quel que soit le site. Après passage dans un échangeur de chaleur, le fluide caloporteur réchauffé, ou refroidi, est acheminé au niveau des sous-stations des bâtiments raccordés, où des PAC ou équivalent permettent d'augmenter ou d'abaisser la température selon l'usage qui en est fait (eau chaude pour le chauffage ou usage sanitaire, eau froide ou eau glacée pour la climatisation). Selon le fonctionnement présenté ci-dessus, les boucles d'eau tempérées constituent une alternative aux réseaux de chaleur et de froid. Dans certaines configurations, elles peuvent aussi être un complément aux réseaux de chaleur et de froid, lorsqu'elles amènent un apport pour l'équilibrage et la régulation du système de distribution global.

Près de 80 % des livraisons totales de froid par les réseaux est concentrée sur la douzaine de réseaux franciliens.

Avec une énergie incidente de 1 300 kWh/m²/an en Métropole, l'énergie solaire se présente comme une ressource utilisable partout en France. Le solaire thermique, au-delà de présenter l'avantage d'un bilan carbone favorable, gagne en compétitivité lorsqu'il est déployé dans le cadre de grandes installations pour les cibles industrielles et agricoles ou en couplage avec les réseaux de chaleur. Cette technologie est à privilégier pour des réseaux à basse température (< 70-90 °C).

En outre, des technologies émergentes voient le jour depuis quelques années dans le secteur collectif, telles que les panneaux hybrides photovoltaïques/thermiques, les systèmes associant capteurs solaires et pompes à chaleur, aussi appelés PAC solaires, etc.

4 Le Fonds Chaleur est un dispositif mis en place par l'État pour subventionner l'investissement dans les réseaux de chaleur et les installations de production de chaleur renouvelable.

LE STOCKAGE AU SEIN DES RÉSEAUX PERMET DE SUBVENIR AUX PÉRIODES DE POINTE DE LA DEMANDE ET DE MAXIMISER LA VALEUR DES RÉSEAUX DE CHALEUR

Les technologies les plus matures de stockage sont dites à chaleur sensible. Elles correspondent à une variation de température sans changement de phase d'un matériau ce qui permet de stocker l'énergie dans des matériaux liquides ou solides (eau, terre, roche, sable…). Une autre technologie vise à utiliser la chaleur latente d'un matériau, on l'appelle stockage par matériau à changement de phase. Enfin, le réseau est lui-même en capacité de stocker la chaleur ou le froid grâce à la masse déjà mobilisée dans les équipements, notamment les canalisations et sous-stations. Les volumes de stockage peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres cubes (jusqu'à 200 000 m³ au Danemark) et stocker jusqu'à 10 % de l'énergie produite sur une saison [7].

On utilise le stockage de chaleur pour répondre à une augmentation de la demande sur le réseau durant les périodes de pointe ou à un déphasage entre la demande et la production de chaleur (chaleur de récupération, solaire par exemple). Le bénéfice du stockage est double, d'une part, il permet d'éviter la congestion du réseau et d'augmenter la part de la fourniture d'EnR&R sans augmenter la puissance installée et donc sans investissement supplémentaire. D'autre part, le stockage de chaleur permet d'accompagner le développement des réseaux, en flexibilisant et en renforçant les capacités de ces réseaux à un coût intéressant, ainsi qu'en minimisant les risques financiers des projets d'extension de réseaux lorsque le contexte d'évolution de la demande est incertain. En effet, on peut évaluer la valeur du stockage pour un réseau en report d'investissement dans une rénovation du réseau pour éviter sa congestion, en particulier pour des faibles augmentations de la demande.

Enfin, il est également possible de stocker du froid sous deux formes : eau glacée ou glace. Cette dernière est plus avantageuse car elle permet de stocker plus d'énergie dans un volume donné.

Au-delà des technologies émergentes citées précédemment, l'AIE finance la recherche sur des technologies à faible TRL dans le cadre d'un programme de coopération technologique [8]. Il est étudié entre autres les différentes possibilités de couplage des réseaux permises par les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains. Une approche intégrée du système énergétique est envisagée, comprenant une infrastructure hybride entre les réseaux électriques, les réseaux de gaz et d'autres vecteurs énergétiques par le biais de divers points de couplage (cogénération, électricité-chaleur/gaz…).

LE RÔLE IMPORTANT DE LA PLANIFICATION TERRITORIALE

À la différence d'autres vecteurs énergétiques, la chaleur renouvelable est produite et consommée à une échelle très locale. À ce titre, toutes les démarches de planification en cours de consolidation à différentes mailles territoriales – PCAET, SCoT, SRADDET… – peuvent contribuer à donner une impulsion nouvelle aux réseaux de chaleur et de froid et à responsabiliser les différents acteurs.

Pour les réseaux de froid, cette tendance aura une incidence d'autant plus forte que ceux-ci partent d'un niveau de développement modeste. La prise de conscience du dérèglement climatique et de l'intensité des vagues de chaleur, en milieu urbain notamment, peut enclencher une dynamique favorable à ces réseaux. La diffusion massive de systèmes autonomes, qui peuvent contribuer en partie au phénomène d'îlot de chaleur urbain, est une incitation supplémentaire à encourager le développement des réseaux de froid.

4. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios

4.1. Méthodologie pour la modélisation des données de la chaleur

La demande de chaleur provient des secteurs résidentiels et tertiaires du bâtiment et de l'industrie.

Côté bâtiment, la demande de chaleur est liée aux usages de chauffage et d'eau chaude sanitaire et a été estimée en fonction de quelques paramètres clés (nombre de logements neufs et existants, besoin thermique des bâtiments, énergies mobilisées pour répondre au besoin thermique…). Chacun de ces paramètres a été calibré en fonction de la philosophie globale des scénarios (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*). Les consommations des bâtiments ont été modélisées avec les modèles ANTONIO (pour le résidentiel) et VIVALDI (pour le tertiaire). Côté industrie, à l'exception de la consommation d'électricité, près de 90 % des consommations énergétiques répondent aujourd'hui à des besoins thermiques. Ce taux a été supposé fixe dans le temps, par contre la part de la consommation d'électricité dédiée à la production de chaleur évolue dans le temps et par scénario (*cf. Tableau 1* et chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

Pour chacun de ces secteurs, la chaleur peut provenir soit des réseaux de chaleur, soit de moyens de production non connectés à un réseau de chaleur. Nous détaillons ci-dessous les hypothèses pour définir la quantité de chaleur provenant des réseaux de chaleur (*cf.* chapitres *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires* et *2.2.3. Production industrielle* concernant la méthodologie pour estimer les moyens de production hors réseaux).

Le travail a consisté à mettre en adéquation, suivant les données de chaque scénario, un volume de chaleur livrée avec un volume de chaleur injectée dans les réseaux en supposant un rendement de distribution en moyenne de 85 %[5]. Ce rendement correspond au rendement moyen observé ces dernières années et nous avons fait l'hypothèse que cette valeur restait constante dans le temps.

Le volume de chaleur est principalement dépendant des hypothèses d'évolution des taux de raccordement des bâtiments résidentiels et tertiaires et de l'évolution des consommations pour les besoins de chaleur de ces bâtiments. Le travail a alors consisté à définir des taux de raccordement moyens en distinguant, pour chaque type de bâtiment, les constructions neuves et existantes. Ces taux de raccordement ont été définis suivant la logique des récits des scénarios et en considérant les hypothèses suivantes :

- **les constructions neuves** ont une probabilité plus importante d'être raccordées à un réseau de chaleur notamment si ces constructions se font en milieu urbain. La réalisation de travaux pour une nouvelle construction est l'occasion de développer un réseau ou d'en construire un nouveau ;
- **au sein du secteur tertiaire**, une probabilité plus élevée d'être raccordé à un réseau de chaleur a été appliquée aux bâtiments liés à la santé, à la recherche et à l'enseignement. En effet, dans la pratique, les hôpitaux ou les bâtiments des collectivités locales sont généralement raccordés aux réseaux.

Tableau 1 Part de la consommation d'électricité dans l'industrie dédiée à la production de chaleur en 2050

	2015	TEND	S1	S2	S3	S4
Part d'électricité dans la chaleur industrielle	15 %	16 %	16 %	19 %	31 %	23 %

5 Il s'agit d'une hypothèse conservatrice, qui ne définit pas un objectif de rendement de distribution pour la filière et ne tient pas compte des progrès réalisés et à venir dans le domaine.

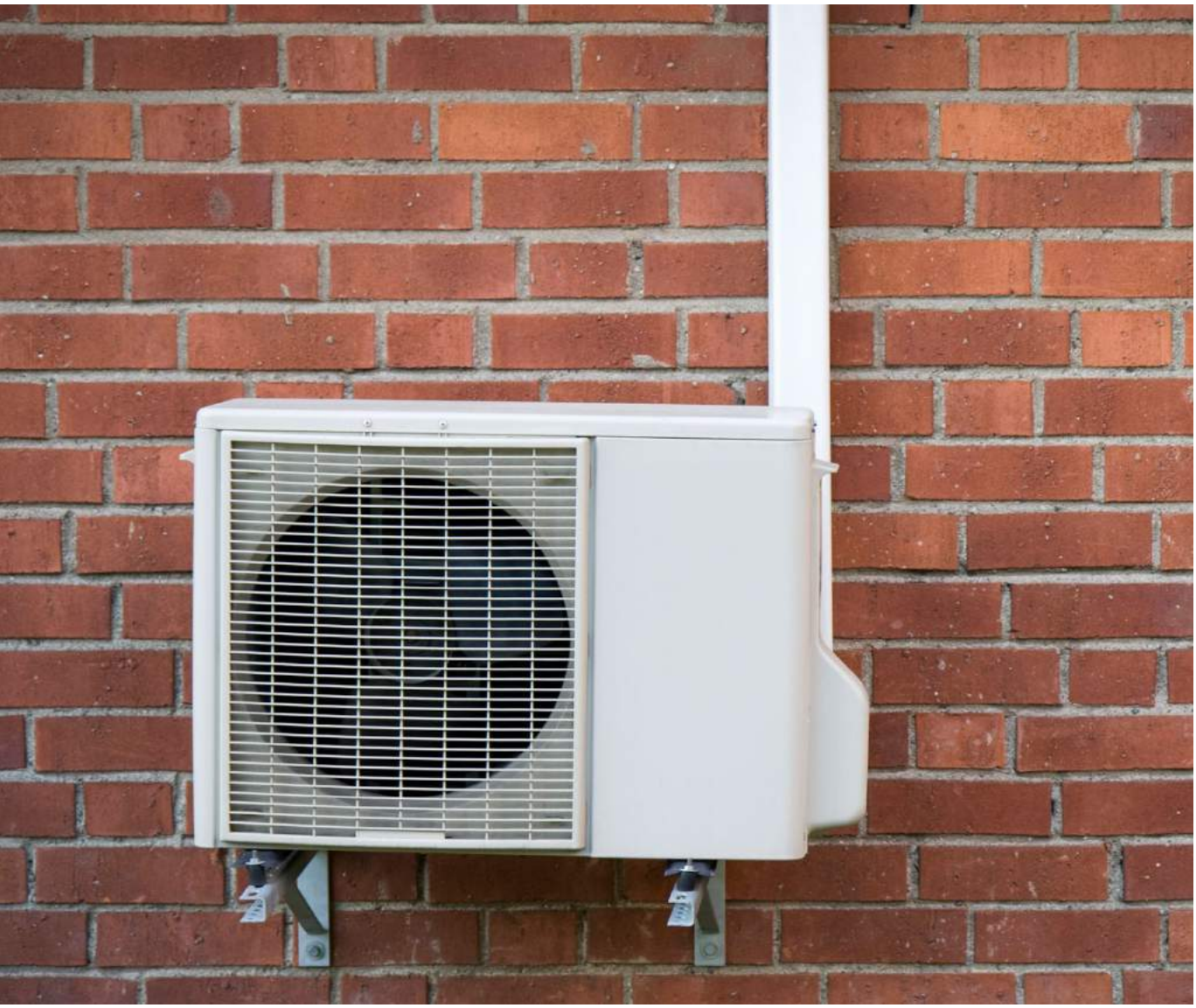
En complément, côté clients industriels, l'hypothèse a été faite que les quantités de chaleur livrées augmentaient peu, ces dernières étant très stables depuis 2010.

À partir de ces hypothèses, ont été estimées les quantités de chaleur livrées aux horizons 2030 et 2050. Pour chaque scénario, le mix de production des réseaux de chaleur a été déterminé en tenant compte des contraintes pesant sur la disponibilité des ressources pour la production de chaleur à partir de biomasse, de déchets ménagers, de chaleur de récupération et du réseau de gaz (*cf.* chapitres *2.3.1. Mix gaz*, *2.3.3. Biomasse énergie* et *2.4.1. Déchets*).

Le mix de production a ensuite été complété par les productions liées à la ressource géothermique et au solaire thermique. Pour ces deux filières, les gisements accessibles ont été repris de l'étude ADEME sur les réseaux de chaleur [9].

4.2. Méthodologie pour la modélisation des données du froid distribué par réseaux

La demande de froid émanant des bâtiments résidentiels et tertiaires pour l'usage climatisation a été estimée avec le modèle MICO (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) en fonction de paramètres tels que l'évolution du climat, le taux d'équipement en climatisation, la qualité thermique du bâti ou encore le comportement des utilisateurs et le type d'équipement de climatisation. Chacun de ces paramètres a été calibré en fonction de la philosophie globale des scénarios (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*).



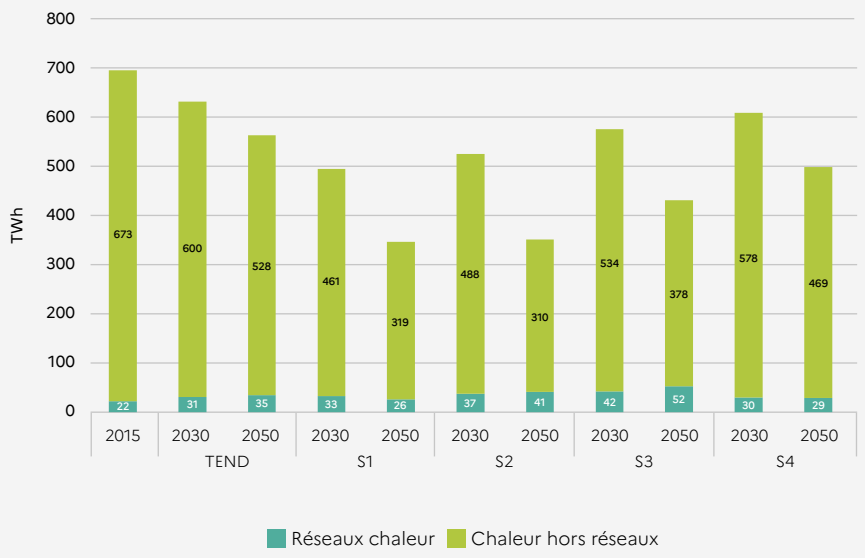
5. Stratégies pour le secteur, selon chaque scénario

Cette section présente les résultats d'abord pour la chaleur, réseaux et hors réseaux, puis pour le froid distribué par les réseaux (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*).

Concernant la chaleur, par rapport à 2015, la demande diminue en 2050 dans l'ensemble des scénarios : - 130 TWh dans le scénario tendanciel, - 200 TWh dans S4, - 280 TWh dans S3 et environ, - 340 TWh dans S1 et S2. **La baisse de la demande totale de chaleur est liée à la diminution des besoins dans les secteurs du bâtiment et de l'industrie** (sauf dans le scénario tendanciel pour l'industrie où le besoin augmente légèrement : + 5 TWh). Ainsi, entre 2015 et 2050, sous l'impulsion des mesures de maîtrise de la demande (rénovation, construction neuve, appareils plus efficients, comportements plus sobres), le besoin de chaleur diminue dans le résidentiel d'environ 190 TWh dans S1 et S2, entre 130 et 150 TWh dans les autres scénarios. Pour les mêmes causes, le besoin de chaleur diminue dans le tertiaire de 80 TWh dans S1 et S2, de 58 TWh dans S3, 35 TWh dans S4 et 10 TWh dans le scénario tendanciel. Au sein de l'industrie, les économies d'énergie couplées à la diminution de la production industrielle entraînent une baisse de la demande de chaleur entre 2015 et 2050 de - 70 TWh dans S1, S2 et S3 et de 16 TWh dans S4.

En revanche, sur la même période, la quantité de chaleur livrée par les réseaux de chaleur augmente dans tous les scénarios. Elle représente 3 % du besoin total de chaleur en 2015 mais, en 2050, 6 % dans le scénario tendanciel et S4, 8 % dans S1 et un peu plus de 10 % dans S2 et S3. Les raisons de cette évolution ainsi que des évolutions du mix des réseaux de chaleur sont détaillées dans la *section 5.1*. La *section 5.2* présente l'évolution des vecteurs énergétiques regroupés sous le terme de chaleur hors réseaux.

Graphique 5 Évolution de la demande de chaleur entre 2015 et 2050 par scénario



5.1. Scénarios pour les réseaux de chaleur

Chaque scénario est caractérisé par une demande et un mix énergétique spécifique, dépendant des évolutions de livraisons de chaleur aux consommateurs et des investissements réalisés dans les EnR&R.

Tableau 2 Évolution de la demande et de la production d'énergie dans les scénarios entre 2020 et 2050 pour les réseaux de chaleur

		TEND	S1	S2	S3	S4
Demande	Résidentiel	+	-	+	+++	--
	Tertiaire	++	-	++	+++	+
	Industrie	+	+	+	+	
Production	Biomasse	++	+++	++++	++++	++
	Géothermie	++	+	+++	++++	+
	UIOM		+		+	+
	Autres (solaire thermique, biogaz, chaleur de récupération)		+	+	++	
	Réseaux de gaz	--	----	----	----	----

5.1.1. Scénario tendanciel

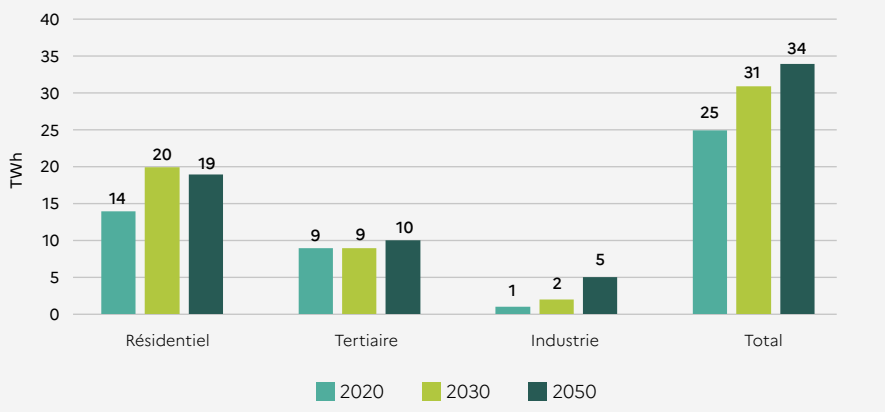
- **Contexte général** : le scénario tendanciel des réseaux de chaleur induit un maximum de constructions neuves dans les métropoles, propices au développement de nouveaux réseaux ou à la densification et à l'extension des réseaux existants. Ainsi, les zones denses des métropoles sont principalement ciblées, avec quelques villes moyennes, ce qui conduit à une croissance plus importante des quantités de chaleur livrées.

- **Demande**[6] : les livraisons de chaleur évoluent à la hausse sur l'ensemble de la période allant de 2020 à 2050, avec environ 9 TWh de chaleur livrée supplémentaire en 2050 dont 6 TWh sur la période 2020 à 2030 et 3 TWh sur la période 2030 à 2050. Entre 2020 et 2030, la croissance est essentiellement portée par le secteur résidentiel (+ 0,5 TWh/an), tandis que les secteurs tertiaire et surtout industriel augmentent plus fortement entre 2030 et 2050 (+ 1 TWh pour le secteur tertiaire, + 3 TWh pour le secteur industriel). Dans le scénario tendanciel, la quantité de chaleur livrée en 2030 par les réseaux de chaleur, 31 TWh, est nettement inférieure à l'objectif fixée par la LTECV (39,5 TWh).

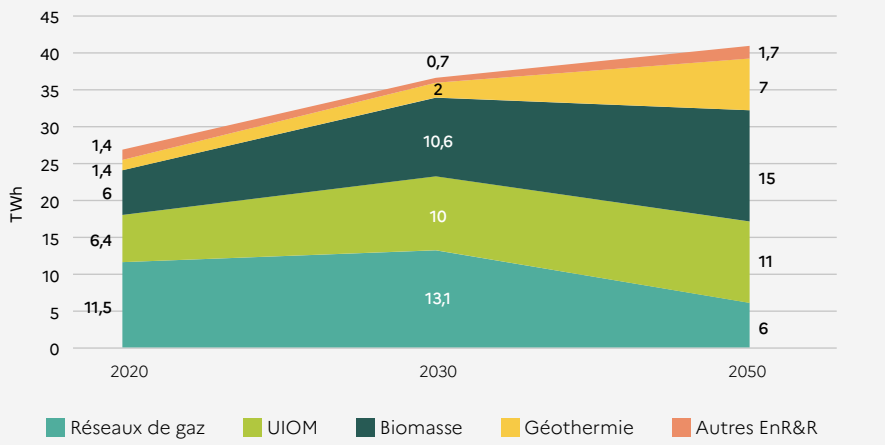
- **Offre** : du côté du mix énergétique, la composition des EnR&R s'appuie sur la biomasse qui progresse sur toute la période allant de 2020 à 2050 (+ 9 TWh), ainsi que la géothermie qui croît majoritairement entre 2030 et 2050 (+ 5 TWh). La part du gaz, qui représente l'essentiel de la production fossile, diminue progressivement entre 2020 et 2050 mais n'est pas totalement remplacée par les EnR&R, passant de 11,5 TWh en 2020 à 6 TWh en 2050.

Les autres énergies sont la chaleur de récupération[7], le biogaz et le solaire thermique et représentent respectivement 0,7 TWh, 0,2 TWh et 0,8 TWh en 2050. Elles progressent peu dans le mix entre 2020 et 2050 (+ 0,3 TWh). Ainsi, on constate que l'objectif de multiplier par cinq la chaleur d'EnR&R en 2030 (par rapport à 2012), soit 39,5 TWh, n'est pas atteint dans ce scénario (23,3 TWh de chaleur EnR&R).

Graphique 6 Livraison de chaleur en sous-station par les réseaux de chaleur dans le scénario tendanciel



Graphique 7 Évolution du mix énergétique des réseaux de chaleur dans le scénario tendanciel



6 Environ 1 TWh n'est pas représenté en 2020 dans le graphique, les données issues de l'enquête annuelle SNCU n'ayant pas été affectées à un secteur précis.
7 Dans l'ensemble du chapitre, la chaleur de récupération provient de processus industriels et des data centers.

5.1.2. Scénario 1

- **Contexte général** : la livraison de chaleur par les réseaux présente une croissance soutenue entre 2020 et 2030, puis une légère baisse entre 2030 et 2050 liée à la baisse de la demande. Les réseaux de chaleur sont développés dans les zones denses et les villes moyennes (de 20 000 à 100 000 habitants) ainsi que les petites villes (moins de 20 000 habitants). On assiste à un phénomène de densification et d'extension des réseaux existants en ce qui concerne les villes moyennes, tandis que de nouveaux réseaux sont construits dans les petites villes (souvent en exploitant la présence d'un incinérateur de déchets à proximité).

- **Demande**[8] : les livraisons de chaleur par les réseaux connaissent d'abord une hausse significative entre 2020 et 2030 (+ 0,6 TWh/an), portées essentiellement par le secteur résidentiel. À partir de 2030, les livraisons diminuent dans tous les secteurs (- 0,3 TWh/an), amenant à une baisse globale de la demande de 7 TWh entre 2030 et 2050.

Cette baisse des livraisons, programmée à partir de 2030, s'explique en partie par une hausse significative des rénovations performantes de logements. En effet, en moyenne, 625 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 531 000 permettant d'atteindre le niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC Rénovation) voire passif.

En regardant de plus près les raccordements de logements dans le résidentiel, on projette une augmentation significative des raccordements sur toute la période étudiée, passant de 6 % de logements alimentés par un réseau de chaleur en 2020 à 11 % en 2050.

Dans le secteur tertiaire, on projette un doublement des surfaces raccordées à un réseau de chaleur entre 2020 et 2050, pour quasiment l'ensemble des secteurs : bureaux, cafés-hôtels-restaurants, commerces, habitat communautaire, santé et transports. Par conséquent, les réseaux alimentent 15 % des surfaces du secteur tertiaire à l'horizon 2050.

Graphique 8 Livraison de chaleur en sous-station par les réseaux de chaleur dans S1

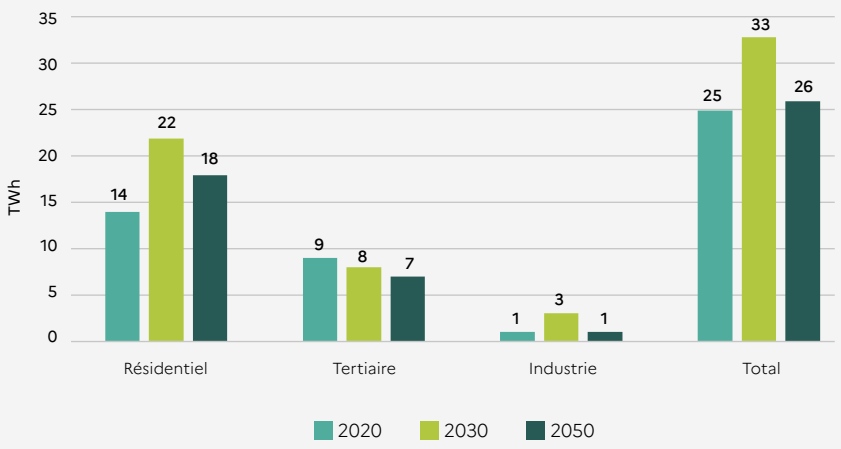


Tableau 3 Évolution du nombre de logements raccordés à un réseau de chaleur dans S1

	2020	2030	2050
Logements raccordés à un réseau de chaleur (Millions)	1,7	2,7	3,5
Total des logements (Millions)	**29,5**	**30,6**	**32,2**
Part réseaux (%)	*6*	*9*	*11*

8 Environ 1 TWh n'est pas représenté en 2020 dans le graphique, les données issues de l'enquête annuelle SNCU n'ayant pas été affectées à un secteur précis.

Tableau 4 *Évolution des surfaces tertiaires raccordées à un réseau de chaleur dans S1*

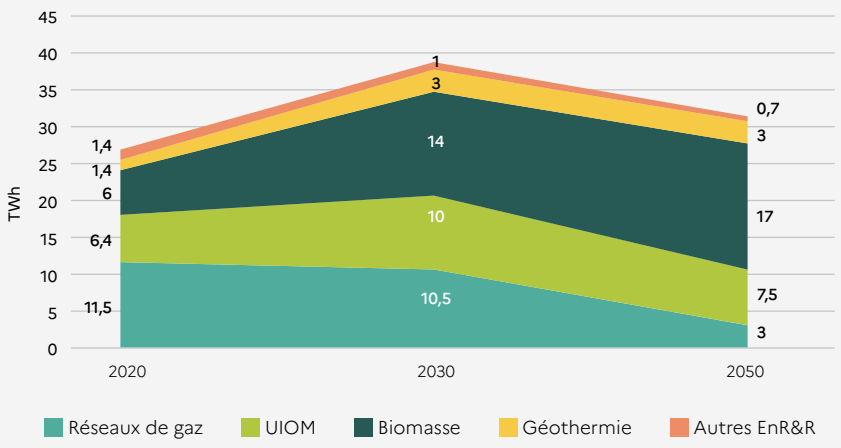
	2020 (Mm²)	2030 (Mm²)	2050 (Mm²)	Part réseaux en 2050 (%)
Bureaux	17,7	22,5	27,9	18
Cafés-hôtels-restaurants	5,7	7,6	10,3	18
Commerces	6,7	8,6	12	6
Enseignement-recherche	15,1	17,1	20,7	17
Habitat communautaire	4,2	7	16,4	15
Santé	11,5	15,9	22,3	21
Sport, loisirs, culture	7,1	9,6	12,8	22
Transports	1,6	2,1	3,2	12
TOTAL	**69,7**	**90,5**	**125,6**	**15**

- **Offre** : les réseaux de chaleur connaissent une progression des quantités de chaleur livrée à base d'EnR&R, en particulier entre 2020 et 2030 (+ 13 TWh), amenant à une décarbonation significative du mix énergétique en 2050 avec environ 90 % d'EnR&R. Une telle proportion s'accompagne nécessairement du développement du stockage thermique, qui va renforcer les capacités des réseaux de chaleur et les solutions de flexibilité telles que les outils de gestion prédictifs de la demande, l'effacement de consommateurs en période de pointe, etc.

La part du gaz diminue progressivement sur l'ensemble de la période, avec une forte baisse entre 2030 et 2050 (- 7,5 TWh), notamment du fait de la fin des tarifs d'achat de l'électricité des centrales de cogénération qui amène à la fermeture partielle de ces moyens de production. Le recours à la biomasse est important et sa part augmente fortement dans le mix (+ 8 TWh entre 2020 et 2030 ; + 3 TWh entre 2030 et 2050). Les autres EnR&R sont la chaleur récupération, le biogaz et le solaire thermique et représentent respectivement 0,4 TWh, 0,2 TWh et 0,1 TWh en 2050. Elles diminuent de moitié dans le mix entre 2020 et 2050 (- 0,7 TWh), notamment à cause d'une demande relativement stable sur la période (environ + 4 TWh entre 2020 et 2050).

Ainsi, on constate que l'objectif de multiplier par cinq la chaleur EnR&R en 2030 (par rapport à 2012), soit 39,5 TWh, n'est pas atteint dans ce scénario (28 TWh).

Graphique 9 *Évolution du mix énergétique des réseaux de chaleur dans S1*



5.1.3. Scénario 2

- **Contexte général** : les livraisons de chaleur représentent une croissance soutenue sur l'ensemble de la période étudiée, avec une très forte accélération entre 2020 et 2030 puis une hausse moins marquée entre 2030 et 2050. Le développement des réseaux de chaleur est axé sur les grandes villes, avec l'interconnexion et l'extension des réseaux existants, ainsi que sur les villes moyennes avec la création de nouveaux réseaux portés par la dynamique territoriale.

- **Demande**[9] : la demande de chaleur livrée par les réseaux augmente significativement entre 2020 et 2030 avec 12 TWh livrés en plus (+ 1,1 TWh/an), portée majoritairement par le secteur résidentiel, puis continue de croître entre 2030 et 2050 avec 4 TWh supplémentaires, à un rythme cependant moins marqué (+ 0,2 TWh/an). C'est la faible croissance de la demande de chaleur des logements qui explique en grande partie le rythme moins marqué d'augmentation des livraisons de chaleur entre 2030 et 2050. Ainsi, ces dernières augmentent d'environ 8 TWh entre 2020 et 2030, puis 1 TWh entre 2030 et 2050. Les rénovations performantes de logements atteignent des niveaux élevés sur la période (35 millions de logements rénovés en 30 ans), ce qui justifie une stabilisation des consommations à partir de 2030. Le secteur tertiaire croît de 3 TWh entre 2020 et 2030 puis de 4 TWh entre 2030 et 2050.

Dans le secteur résidentiel, alors que le rythme de rénovation du parc se poursuit à marche forcée (en moyenne, 618 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 524 000 permettant d'atteindre le niveau Bâtiment Basse Consommation [BBC Rénovation] voire passif), on assiste dans le même temps à une hausse des raccordements de logements à des réseaux de chaleur, passant d'abord de 6 % à 10 % du parc résidentiel entre 2020 et 2030, puis jusqu'à 15 % en 2050.

Dans le secteur tertiaire, trois fois plus de surfaces sont raccordées aux réseaux de chaleur en 2050 par rapport à 2020. Ce niveau de hausse est visible dans l'ensemble des secteurs, avec certains secteurs plus concernés que d'autres tels que l'habitat communautaire, l'enseignement-recherche ou encore la santé qui dépassent les 50 % de surfaces raccordées à un réseau. Au total, 33 % des surfaces sont raccordées à un réseau de chaleur en 2050.

Graphique 10 *Livraison de chaleur en sous-station par les réseaux de chaleur dans S2*

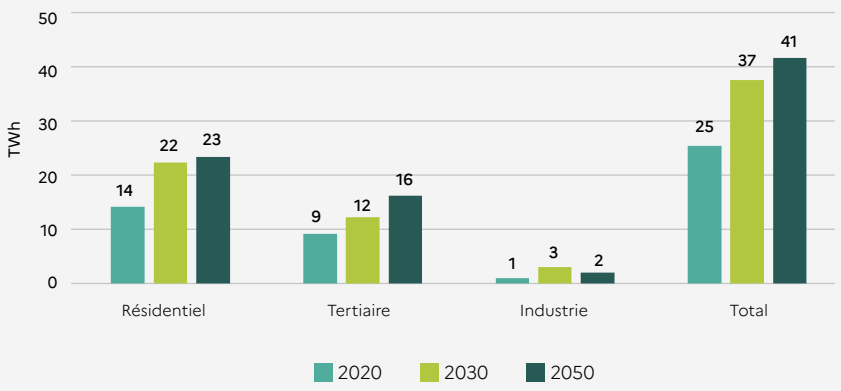


Tableau 5 *Évolution du nombre de logements raccordés à un réseau de chaleur dans S2*

	2020	2030	2050
Logements raccordés à un réseau de chaleur (Millions)	1,7	3,1	5
Total des logements (Millions)	**29,5**	**30,5**	**32,5**
Part réseaux (%)	*6*	*10*	*15*

9 Environ 1 TWh n'est pas représenté en 2020 dans le graphique, les données issues de l'enquête annuelle SNCU n'ayant pas été affectées à un secteur précis.

Tableau 6 *Évolution des surfaces tertiaires raccordées à un réseau de chaleur dans S2*

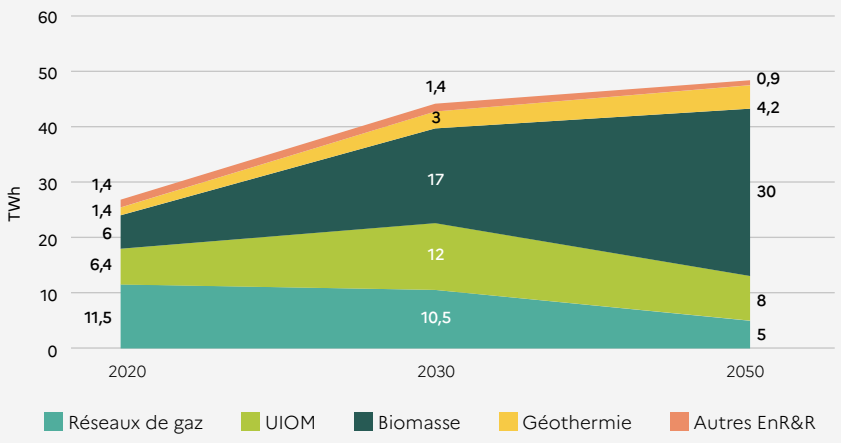
	2020 (Mm²)	2030 (Mm²)	2050 (Mm²)	Part réseaux en 2050 (%)
Bureaux	17,7	30,1	47,2	30
Cafés-hôtels-restaurants	5,7	9,8	16,6	29
Commerces	6,7	10,9	18,2	9
Enseignement-recherche	15,1	35,4	61,5	51
Habitat communautaire	4,2	17,7	56,6	51
Santé	11,5	27,7	54,7	52
Sport, loisirs, culture	7,1	12,2	19,6	33
Transports	1,6	2,6	4,8	18
TOTAL	**69,7**	**146,4**	**279,2**	**33**

- **Offre** : en ce qui concerne le mix énergétique, les EnR&R connaissent une forte croissance (+ 28 TWh entre 2020 et 2050), portée essentiellement par la biomasse et, dans une moindre mesure, par la géothermie. Les potentiels de ces deux énergies sont largement exploités entre 2030 et 2050 (respectivement + 13 TWh et + 1,2 TWh), tandis que les UIOM plafonnent en 2030 à 12 TWh avant de redescendre à 8 TWh en 2050. La part des EnR&R atteint ainsi 90 % dans le mix énergétique en 2050 ce qui nécessite le développement, d'une part, du stockage thermique dans les réseaux de chaleur pour renforcer leurs capacités et d'autre part, de solutions de flexibilité tels que les outils de gestion prédictifs de la demande, l'effacement de consommateurs en période de pointe, etc.

La part issue du gaz diminue lentement entre 2020 et 2030 (- 1 TWh), puis connaît une baisse importante entre 2030 et 2050 (- 5,5 TWh), notamment avec la fin des tarifs d'achat d'électricité des centrales de cogénération. Les autres EnR&R sont la chaleur de récupération, le biogaz et le solaire thermique qui représentent respectivement 0,5 TWh, 0,2 TWh et 0,2 TWh en 2050. Après une stagnation entre 2020 et 2030, elles diminuent sur la période 2030 et 2050 (- 0,5 TWh).

Ainsi, on constate que l'objectif de multiplier par cinq la chaleur EnR&R en 2030 (par rapport à 2012), soit 39,5 TWh, est proche d'être atteint dans ce scénario (33,4 TWh) porté par la croissance de la biomasse et des UIOM dans le mix énergétique.

Graphique 11 *Évolution du mix énergétique des réseaux de chaleur dans S2*



5.1.4. Scénario 3

- **Contexte général** : les livraisons de chaleur présentent une croissance importante sur l'ensemble de la période 2020 à 2050, essentiellement soutenue par les secteurs résidentiel et tertiaire. Les réseaux de chaleur se développent dans les grandes villes par extension et interconnexion, mais également *via* des créations réseaux. En effet, on parle de nouvel esprit haussmannien, qui implique la déconstruction et la reconstruction des grandes villes, favorisant le développement des réseaux de chaleur. Cela amène à la création de très grands réseaux urbains permettant d'interconnecter toutes les sources de EnR&R.

- **Demande**[10] : la demande de chaleur augmente très significativement entre 2020 et 2030 (+ 1,5 TWh/an) pour atteindre 42 TWh et continue sa hausse entre 2030 et 2050 à un rythme moins soutenu (+ 0,5 TWh/an) pour arriver à 52 TWh. Le secteur résidentiel joue le rôle principal dans cette croissance, augmentant de 13 TWh entre 2020 et 2030, puis 4 TWh entre 2030 et 2050. Le secteur tertiaire connaît une croissance plus modeste avec une augmentation de 2 TWh entre 2020 et 2030, et de 6 TWh entre 2030 et 2050, tandis que l'industrie atteint 5 TWh dans ce scénario en 2050 (+ 4 TWh par rapport à 2020).

Les rénovations de logements sont plus modérées (en moyenne, 511 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 125 000 permettant d'atteindre le niveau Bâtiment Basse Consommation [BBC Rénovation] voire passif). Dans le même temps, la part de logements raccordés à un réseau de chaleur connaît une très forte croissance, passant de 6 % en 2020 à 14 % en 2030 et 24 % en 2050 soit environ 8 millions de logements raccordés.

Dans le tertiaire, trois fois plus de surfaces sont raccordées en 2050 par rapport à 2020, avec environ 250 millions de mètres carrés. Environ un tiers des surfaces sont alimentées par un réseau de chaleur dans les bureaux, les restaurants, l'enseignement, la santé, le sport et la culture.

Graphique 12 Livraison de chaleur en sous-station par les réseaux de chaleur dans S3

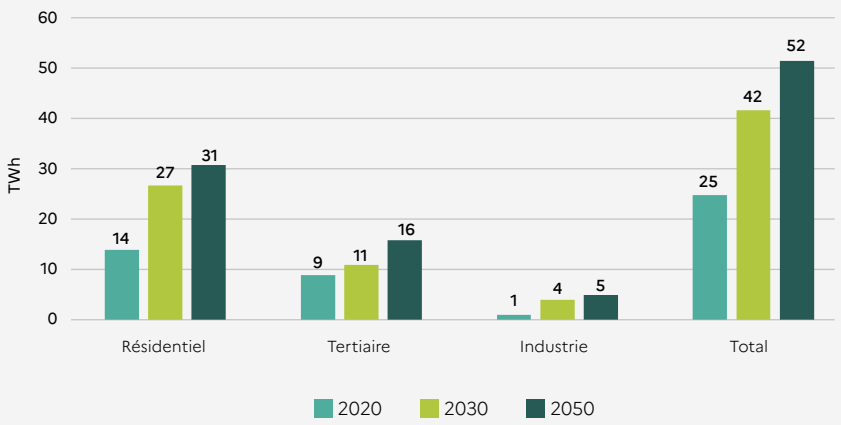


Tableau 7 Évolution du nombre de logements raccordés à un réseau de chaleur dans S3

	2020	2030	2050
Logements raccordés à un réseau de chaleur (Millions)	1,7	4,4	8
Total des logements (Millions)	**29,5**	**31,3**	**33,8**
Part réseaux (%)	*6*	*14*	*24*

10 Environ 1 TWh n'est pas représenté en 2020 dans le graphique, les données issues de l'enquête annuelle SNCU n'ayant pas été affectées à un secteur précis.

Tableau 8 Évolution des surfaces tertiaires raccordées à un réseau de chaleur dans S3

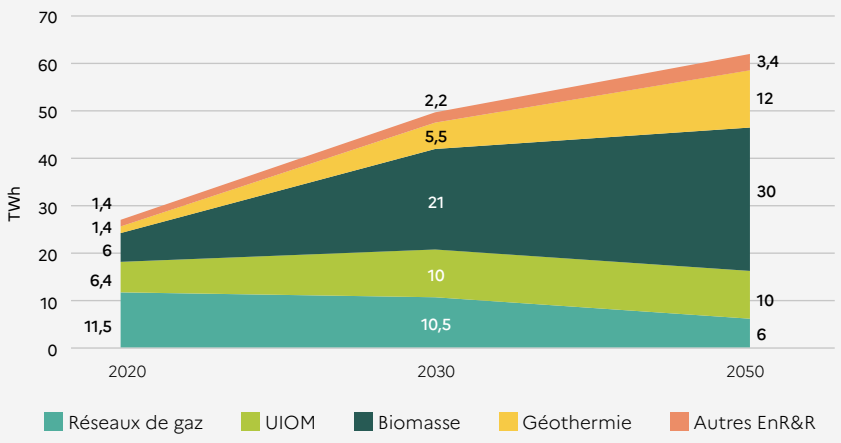
	2020 (Mm²)	2030 (Mm²)	2050 (Mm²)	Part réseaux en 2050 (%)
Bureaux	17,7	31,8	55,3	30
Cafés-hôtels-restaurants	5,7	10,6	20,8	29
Commerces	6,7	11,1	19,8	9
Enseignement-recherche	15,1	24,3	46,2	27
Habitat communautaire	4,2	10	31,8	29
Santé	11,5	21,7	42,8	34
Sport, loisirs, culture	7,1	13,6	27,5	34
Transports	1,6	2,6	4,8	18
TOTAL	**69,7**	**125,7**	**248,9**	**25**

- **Offre** : concernant le mix énergétique, les EnR&R connaissent une forte croissance entre 2020 et 2030 (+ 24 TWh), avec une tendance qui se poursuit entre 2030 et 2050 (+ 17 TWh). Cette croissance est largement portée par la biomasse (+ 24 TWh entre 2020 et 2050), alors que la géothermie connaît également un essor important, passant de 1,4 TWh en 2020 à 12 TWh en 2050. La part des EnR&R atteint ainsi 90 % du mix en 2050 ce qui nécessite le développement, d'une part, du stockage thermique dans les réseaux de chaleur pour renforcer les capacités de ces réseaux et, d'autre part, de solutions de flexibilité tels que les outils de gestion prédictifs de la demande, l'effacement de consommateurs en période de pointe, etc.

La part du gaz diminue lentement entre 2020 et 2030 (- 1 TWh), puis plus fortement entre 2030 et 2050 (-4,5 TWh), notamment avec la fin des tarifs d'achat d'électricité des centrales de cogénération. Les autres EnR&R sont la chaleur de récupération, le biogaz et le solaire thermique qui représentent respectivement 2 TWh, 0,2 TWh et 1,2 TWh en 2050. Elles augmentent assez significativement dans ce scénario entre 2020 et 2050 (+ 2 TWh).

Ainsi, on constate que l'objectif de multiplier par cinq la chaleur d'EnR&R en 2030 (par rapport à 2012), soit 39,5 TWh, est quasiment atteint dans ce scénario (38,7 TWh) porté par la forte croissance de la biomasse dans le mix énergétique, ainsi que par la géothermie.

Graphique 13 Évolution du mix énergétique des réseaux de chaleur dans S3



5.1.5. Scénario 4

- **Contexte général** : les livraisons de chaleur par les réseaux de chaleur connaissent une certaine stabilité sur l'ensemble de la période allant de 2020 à 2050, avec une légère hausse entre 2020 et 2030, suivie par une baisse entre 2030 et 2050. Les réseaux de chaleur se développent par création dans les métropoles qui n'en possèdent pas encore, ainsi que par densification et extension dans les zones avec un réseau existant.

- **Demande**[11] : la demande de chaleur est relativement stable avec une croissance faible entre 2020 et 2030 (+ 0,4 TWh/an), puis une légère décroissance des volumes livrés entre 2030 et 2050 (- 0,07 TWh/an). Cette tendance à la quasi-stabilité s'explique par la baisse des livraisons de chaleur dans le secteur résidentiel (- 2 TWh entre 2030 et 2050) et une faible croissance dans les secteurs tertiaire et industriel (+ 1 TWh dans les 2 secteurs entre 2020 et 2050).

Le parc résidentiel connaît une rénovation des logements relativement modeste : en moyenne, 228 000 logements par an font l'objet d'une rénovation de l'ensemble de leur enveloppe, dont 187 000 permettant d'atteindre le niveau Bâtiment Basse Consommation (BBC Rénovation) voire passif. Sur cette période, le nombre de logements raccordés à un réseau de chaleur augmente peu entre 2020 et 2030 avec + 0,5 million de logements, passant de 6 à 7 % de part des logements raccordés. Entre 2030 et 2050, 0,5 million de logements supplémentaires sont raccordés et la part de raccordements reste à 7 %.

Dans le secteur tertiaire, deux fois plus de surfaces sont raccordées en 2050 par rapport à 2020 dans quelques secteurs (bureaux, enseignement, sport et culture), tandis que d'autres secteurs voient une croissance plus importante de leur livraison sur la même période (habitat communautaire, santé).

Graphique 14 *Livraison de chaleur en sous-station par les réseaux de chaleur dans S4*

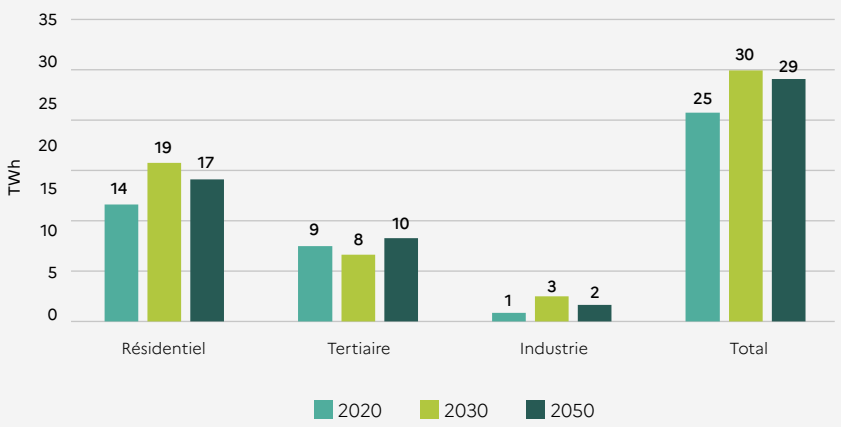


Tableau 9 *Évolution du nombre de logements raccordés à un réseau de chaleur dans S4*

	2020	2030	2050
Logements raccordés à un réseau de chaleur (Millions)	1,7	2,2	2,7
Total des logements (Millions)	**29,5**	**31,3**	**33,8**
Part réseaux (%)	*6*	*7*	*7*

11 Environ 1 TWh n'est pas représenté en 2020 dans le graphique, les données issues de l'enquête annuelle SNCU n'ayant pas été affectées à un secteur précis.

Tableau 10 Évolution des surfaces tertiaires raccordées à un réseau de chaleur dans S4

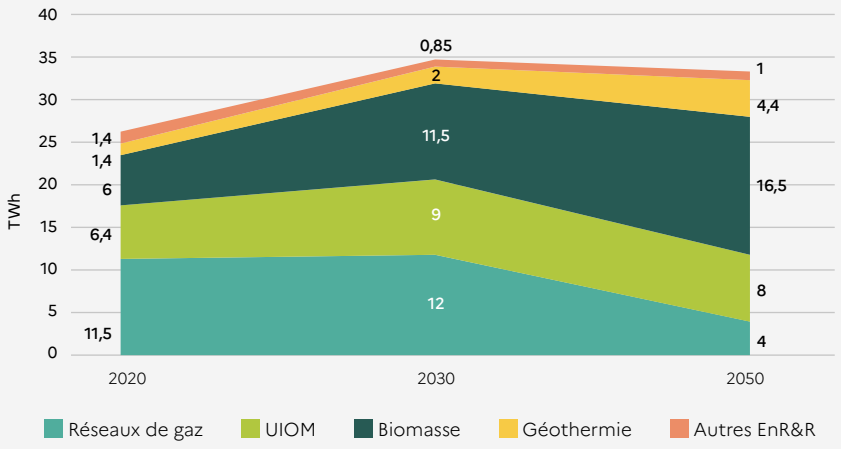
	2020 (Mm²)	2030 (Mm²)	2050 (Mm²)	Part réseaux en 2050 (%)
Bureaux	17,7	22,6	28,9	16
Cafés-hôtels-restaurants	5,7	6,3	7,3	8
Commerces	6,7	6,7	6,6	3
Enseignement-recherche	15,1	20,5	33,5	16
Habitat communautaire	4,2	8,6	27,2	25
Santé	11,5	18	32,9	20
Sport, loisirs, culture	7,1	9,4	16,7	14
Transports	1,6	1,6	1,6	6
TOTAL	**69,7**	**93,7**	**154,6**	**14**

- **Offre** : en ce qui concerne le mix énergétique, les EnR&R tirent profit de la relative stagnation de la demande en augmentant de manière significative dans le mix dès 2030 (+ 8 TWh), puis en poursuivant cette hausse entre 2030 et 2050 (+ 7 TWh). La composition du mix renouvelable reste assez similaire à celle d'aujourd'hui, la biomasse et la géothermie évoluant à un rythme soutenu (respectivement + 5 TWh et + 2,4 TWh entre 2030 et 2050). Ainsi, la part des EnR&R atteint 88 % du mix énergétique en 2050. Une telle part d'EnR&R dans le mix énergétique est accompagnée nécessairement par le développement du stockage thermique, qui va renforcer les capacités des réseaux de chaleur et par des solutions de flexibilité pour les réseaux tels que les outils de gestion prédictifs de la demande, l'effacement de consommateurs en période de pointe, etc.

La part du gaz augmente légèrement entre 2020 et 2030 (+ 0,5 TWh), avant de connaître une baisse drastique entre 2030 et 2050 (- 8 TWh). Cela s'explique en partie par la fin des tarifs d'achat d'électricité des centrales de cogénération. Les autres EnR&R sont la chaleur de récupération, le biogaz et le solaire thermique qui représentent respectivement 0,4 TWh, 0,3 TWh et 0,3 TWh en 2050. Elles diminuent légèrement entre 2020 et 2050 (- 0,4 TWh).

Ainsi, on constate que l'objectif de multiplier par cinq la chaleur d'EnR&R en 2030 (par rapport à 2012) soit 39,5 TWh est loin d'être atteint dans ce scénario (23,4 TWh).

Graphique 15 Évolution du mix énergétique des réseaux de chaleur dans S4



5.1.6. Comparaison des scénarios

Dans S1, le développement des réseaux de chaleur repose sur des extensions et la création de petits réseaux, avec une hausse importante du recours au bois et une diminution significative du gaz en 2050 qui reste présent afin de faire face essentiellement aux pics de consommation et aux éventuelles pannes des moyens de production EnR&R. Malgré une hausse continue des raccordements, les livraisons diminuent entre 2030 et 2050 car les besoins diminuent *via* la rénovation des bâtiments et une sobriété accrue.

Dans S2, le développement des réseaux de chaleur se concentre dans les villes moyennes avec des créations et/ou des extensions. Le recours au bois et aux UIOM est important, tandis que le gaz diminue significativement à l'horizon 2050. Les livraisons augmentent sur l'ensemble de la période malgré les rénovations qui réduisent les besoins.

Dans S3, le développement des réseaux de chaleur est centré dans les métropoles avec principalement des extensions de réseaux au sein de ces zones. Le recours au bois reste important, ainsi qu'aux UIOM et à la géothermie, tandis que le gaz diminue de manière significative en 2050. Comme dans S2, les livraisons augmentent sur l'ensemble de la période malgré les rénovations qui réduisent les besoins.

Dans S4, le développement des réseaux de chaleur suit un rythme tendanciel avec un développement significatif du recours au bois et une diminution des énergies fossiles à l'horizon 2050. Les livraisons diminuent entre 2030 et 2050 car les besoins diminuent (principalement grâce à la rénovation des bâtiments).

Du point de vue de la demande de chaleur, les trois secteurs principaux (résidentiel, tertiaire et industriel) ont été estimés en prenant en compte principalement le nombre de bâtiments créés ainsi que la surface des bâtiments tertiaires (l'industrie demande peu de chaleur par les réseaux dans tous les scénarios). Dans S2 et S3, les volumes livrés dans le secteur résidentiel croissent en 2030 et 2050 tandis que dans S1 et S4, ils baissent à l'horizon 2050. Dans le tertiaire, la hausse des volumes livrés est nette dans S2, S3 et S4 en 2030 puis 2050, tandis que les livraisons baissent dans S1, du fait de l'anticipation de l'impact fort du décret tertiaire, entré en vigueur en 2020 et fixant des objectifs contraignants au secteur.

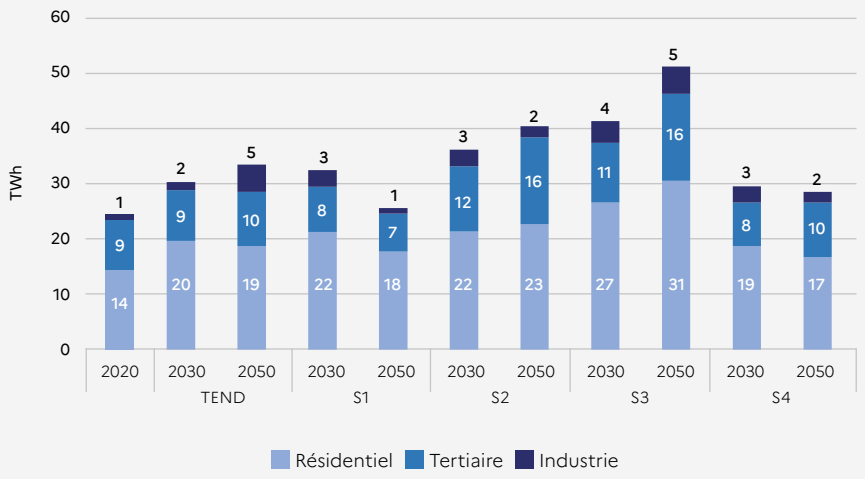
Du point de vue du mix énergétique des réseaux de chaleur[12], la biomasse prend une part significative dans les 4 scénarios (en particulier dans S2 et S3 où les livraisons de chaleur sont les plus importantes), avec une croissance significative entre 2030 et 2050. Les UIOM maintiennent une part non négligeable dans le mix, malgré un potentiel faible qui implique une baisse des volumes entre 2030 et 2050 (à l'exception de S3), justifié par les politiques de réduction des déchets. La production géothermique connaît une hausse des volumes livrés entre 2030 et 2050 dans tous les scénarios (à l'exception de S1 où elle stagne). Concernant les autres EnR&R, à savoir la chaleur de récupération, le biogaz (méthanisation en injection directe) et le solaire thermique, elles gardent une part très minoritaire dans le mix de production en 2030 et 2050 (entre 2 et 6 % suivant les scénarios).

12 Les besoins indiqués dans le *Graphique 17* présentant le mix de production correspondent aux livraisons totales avec l'ajout des pertes du réseau, estimées à 15 % dans tous les scénarios.

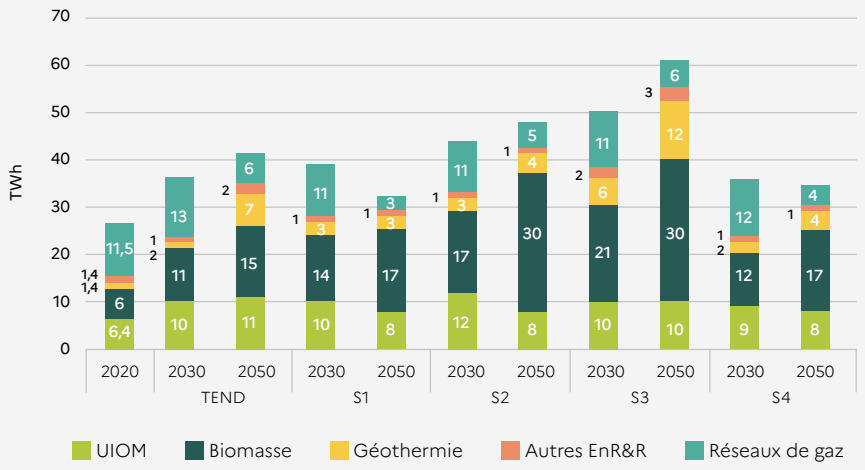
Le gaz est toujours présent en 2050 pour assurer les périodes de pointe de consommation ainsi que les éventuelles pannes des moyens de production d'EnR&R. La décarbonation du gaz est variable en fonction du niveau de mobilisation des différentes sources de production, notamment la méthanisation, la pyrogazéification de la biomasse ou le *power-to-methane* qui varie en fonction de chaque scénario. Ce point est traité précisément dans le chapitre *2.3.1. Mix gaz*.

Ainsi, l'objectif de multiplier par cinq la chaleur d'EnR&R en 2030 (par rapport à 2012), soit 39,5 TWh, est proche d'être atteint uniquement dans S2 et S3 (respectivement 33,4 TWh et 38,7 TWh) portés systématiquement par une croissance significative de la biomasse et dans une moindre mesure des UIOM (pour S2) et de la géothermie (pour S3).

Graphique 16 *Livraison de chaleur en sous-station en 2030 et 2050 selon les scénarios*



Graphique 17 *Mix de production de la chaleur dans les réseaux en 2030 et 2050 selon les scénarios*



5.2. Scénarios pour la chaleur hors réseaux

Chaque scénario est caractérisé par une demande globalement à la baisse pour la chaleur hors réseaux et par un mix énergétique spécifique, dépendant du caractère plus ou moins centralisé du scénario et des investissements réalisés dans les EnR&R.

Dans les années à venir, la part de la production fossile dans la production de chaleur hors réseaux tend à décroître par l'effet conjugué des politiques d'investissements dans la rénovation énergétique des bâtiments ainsi que dans les moyens de production d'EnR&R *(Graphique 18)*. Ainsi, si les EnR&R représentent 16 % de la consommation de chaleur hors réseaux en 2015, elles représentent en 2050 environ 60 % de cette consommation dans S1, S2 et S3, 45 % dans S4 et 30 % dans le scénario tendanciel.

Dans le secteur résidentiel, alors que les EnR&R représentent 25 % de la production de la chaleur hors réseaux en 2015, cette part augmente jusqu'à atteindre près de 70 % dans l'ensemble des scénarios en 2050 (sauf dans le scénario tendanciel où la part est de 44 %).

Dans le secteur tertiaire, les EnR&R se développent également de façon conséquente : alors qu'elles représentaient 6 % de la production hors réseaux en 2015, leur part en 2050 est d'environ 50 % dans S1, S2 et S3 et autour de 25 % dans les scénarios tendanciel et S4. La tendance est similaire dans l'industrie où la part des EnR&R dans la production de chaleur hors réseaux évolue de 9 % en 2015 à environ 60 % dans S1 et S2, 45 % dans S3, 30 % dans S4 et 20 % dans le scénario tendanciel en 2050.

En ce qui concerne le mix énergétique EnR&R dans la production de chaleur hors réseaux, on constate que la biomasse solide, utilisée de manière significative dans l'ensemble des secteurs, a tendance à baisser dans tous les scénarios entre 2015 et 2050 *(Graphique 19)*. De façon détaillée, le nombre de logements chauffés au bois a tendance à augmenter sur l'ensemble de la période 2015 à 2050 dans les scénarios 1 à 3, passant ainsi de 3,6 millions à 6 à 12 millions suivant le scénario (12,1 millions en S1, 9,8 millions en S2 et 6 millions en S3), tandis qu'il diminue à 2 millions en S4. Pourtant, les consommations réelles baissent dans chaque scénario, ce qui s'explique par une meilleure efficacité énergétique des bâtiments et des équipements dans la période. Dans l'industrie, l'usage de la biomasse augmente entre 2015 et 2050 dans S1 et S2 (+20 TWh environ), mais recule dans le scénario tendanciel, S3 et S4 (respectivement - 2 TWh, - 3 TWh et - 6 TWh).

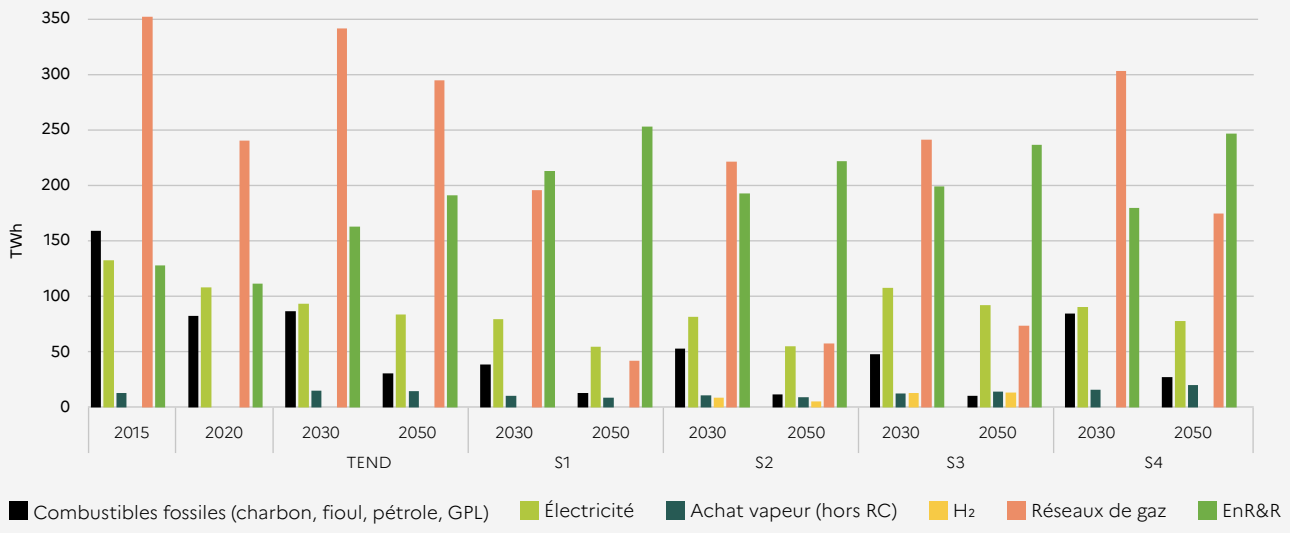
À l'inverse, le recours aux pompes à chaleur aérothermique/CET[13] et géothermiques dans les secteurs du bâtiment augmente significativement dans tous les scénarios entre 2015 et 2050[14], en particulier pour les PAC géothermiques (entre un facteur 3 et 5 pour les PAC aérothermiques/CET et entre un facteur 12 et 54 pour les PAC géothermiques), ce qui accroît *in fine* le recours à l'électricité pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire dans le résidentiel et le tertiaire principalement. Dans le secteur résidentiel, alors que 1,2 million de logements disposent de PAC aérothermiques/CET et géothermiques[15] en 2015, l'ensemble des scénarios projette un recours massif aux PAC avec une montée significative dès 2030, qui se poursuit en 2050 (12,5 millions en S1, 10,9 millions en S2, 8,8 millions en S3 et 17,8 millions en S4, 11,8 millions dans le scénario tendanciel). Dans les bâtiments tertiaires, alors que seulement 3 % de la chaleur hors réseaux provient de PAC en 2015, cette part monte jusqu'à 22 % dans S1 (16 % en S2 et S3, 13 % en S4 et dans le scénario tendanciel).

13 CET : Chauffe-Eau Thermodynamique.
14 Les données présentées sur les PAC concernent uniquement la chaleur renouvelable prélevée sur l'environnement, elle ne prend pas en compte la consommation d'électricité.
15 Les PAC hybrides sont réparties entre les PAC aérothermiques et géothermiques dans les scénarios.

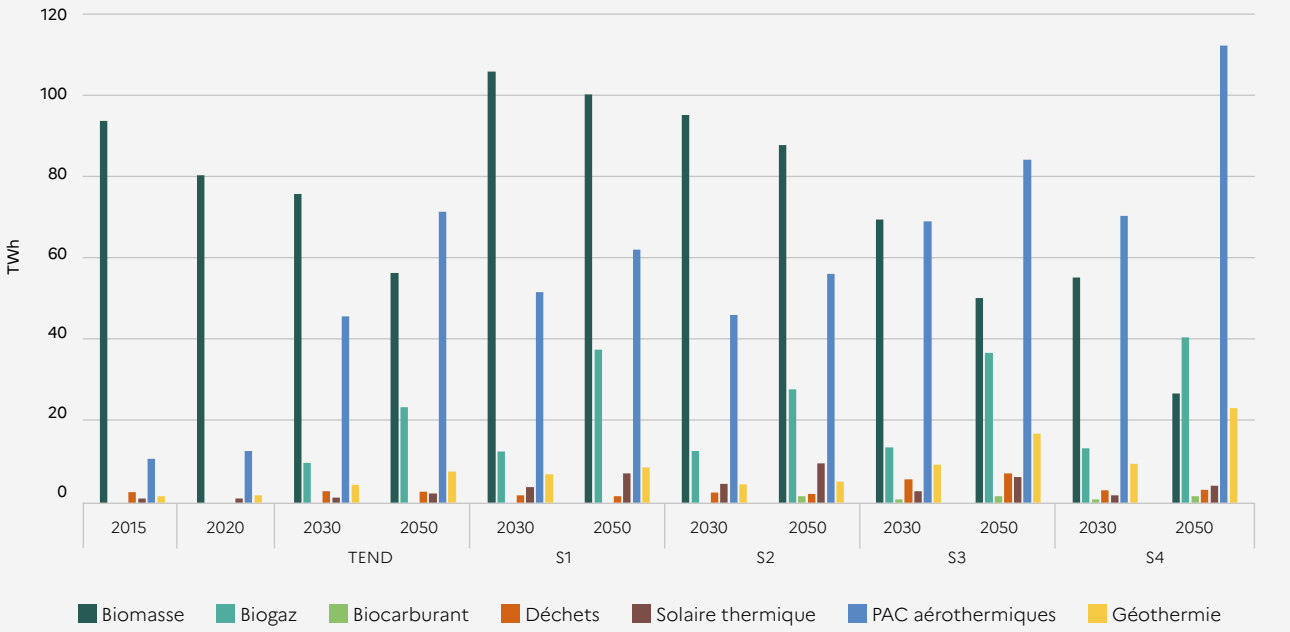
Également, au sein de l'industrie, l'usage du biogaz progresse significativement entre 2015 et 2050. Si l'utilisation de biogaz est quasi nulle en 2015 dans l'industrie, elle représente en 2050 environ 40 TWh dans S1, S3 et S4, près de 30 TWh dans S2 et 23 TWh dans le scénario tendanciel.

Enfin, le recours au solaire thermique progresse également dans tous les scénarios entre 2015 et 2050 dans les secteurs du bâtiment et de l'industrie. En 2050, cela représente une surface moyenne posée de panneaux solaires thermiques de 13 millions de mètres carrés dans S1, 17,5 millions de mètres carrés dans S2, 11,3 millions de mètres carrés dans S3 et 7,6 millions de mètres carrés dans S4[16].

Graphique 18 *Mix énergétique de la chaleur hors réseaux*[17]



Graphique 19 *Évolution de la production de chaleur EnR&R hors réseaux*



16 Productivité moyenne considérée pour les panneaux solaires thermiques de 550 kWh/m²/an.
17 L'achat de vapeur (hors RC) désigne l'achat de vapeur par des industriels principalement à des centrales de production utilisant du bois, du gaz ou des CSR. La segmentation n'étant pas disponible pour 2015, la donnée est présentée sous une forme agrégée.

5.3. Synthèse des scénarios pour la chaleur réseaux et hors réseaux

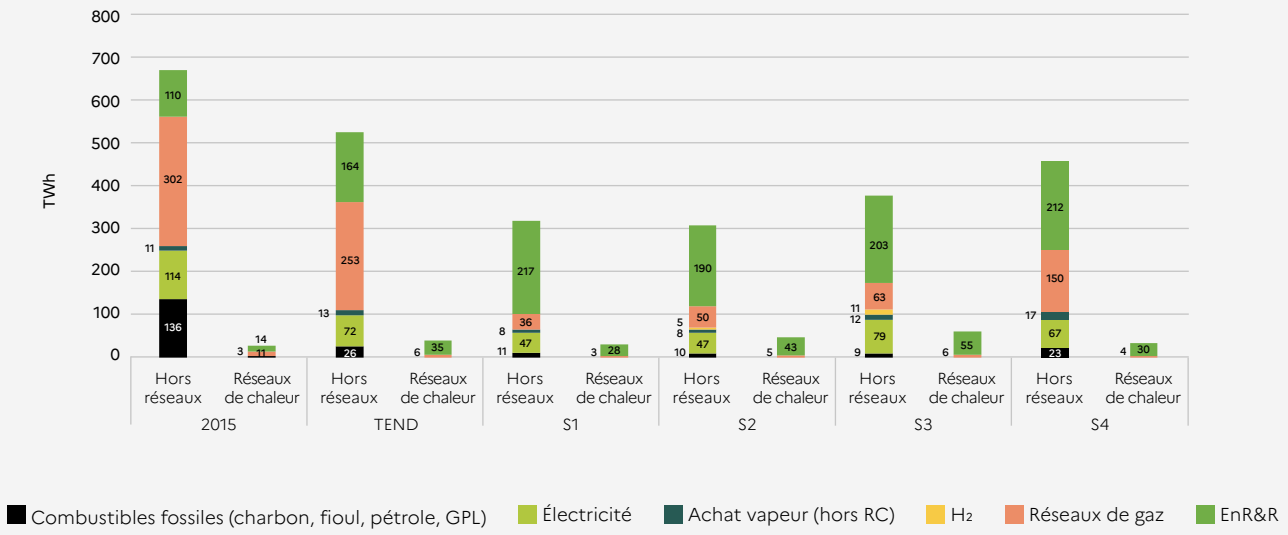
En conclusion, l'exercice de scénarisation de la chaleur réseaux et hors réseaux permet d'établir plusieurs constats.

Tout d'abord, les énergies fossiles diminuent dans tous les scénarios, dans et hors réseaux. Alors que le fioul et le charbon disparaissent ou gardent une part très marginale dans le mix en 2050, les réseaux de gaz se maintiennent mais à des niveaux moindres, passant dans la chaleur hors réseaux et dans les réseaux respectivement de 45 % et 39 % en 2015 à 11 % et 10 % en 2050 dans S1, 16 % et 10 % dans S2, 17 % et 10 % dans S3, 32 % et 12 % dans S4. À l'échéance 2050, les réseaux de gaz sont décarbonés à plus de 80 % dans S1, S2 et S3 (*cf.* chapitre *2.3.1. Mix gaz*).
Les EnR&R progressent et deviennent majoritaires dans tous les scénarios. Dans la chaleur hors réseaux, elles passent de 15 % en 2015 à environ 60 % dans S1, S2 et S3 et 45 % dans S4[18]. Dans les réseaux de chaleur, les EnR&R (biomasse, UIOM, géothermie, chaleur de récupération, biogaz et solaire thermique) connaissent une augmentation très importante dans tous les scénarios, passant de 50 % en 2015 à 90 % dans S1, S2 et S3 et 88 % dans S4.

De plus, l'ensemble des scénarios montre un accroissement de la part des réseaux de chaleur dans la fourniture de chaleur. Alors que ces derniers représentaient 4 % de la chaleur globale en 2015, on projette que cette part double au minimum à l'horizon 2050 : 7 % dans le scénario tendanciel, 8 % dans S1, 12 % dans S2, 13 % dans S3 et 6 % dans S4.

Les réseaux de chaleur profitent des efforts d'efficacité énergétique, notamment dans les secteurs résidentiel et tertiaire, pour augmenter leurs volumes de livraison, puisque c'est dans les scénarios où les consommations globales diminuent le plus que les volumes de production des réseaux sont les plus importants en 2050 passant de 27 TWh en 2015 à 31,2 TWh dans S1 en 2050, 48,1 TWh dans S2 et 61,4 TWh dans S3.

Graphique 20 Synthèse des scénarios pour les mix énergétiques de la chaleur réseaux et hors réseaux en 2050



18 Hors électricité.

5.4. Scénarios pour les réseaux de froid

Les besoins de froid, hors réseaux de froid, sont associés aux besoins de rafraîchissement et font l'objet d'analyses générales et par scénario dans le chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires* de ce rapport, et notamment dans la *section 5.6.5*, *Climatisation*.

Chaque scénario est caractérisé par une demande et un mix énergétique spécifiques, dépendant des évolutions de livraisons de froid aux consommateurs et des investissements réalisés dans les EnR&R. En l'absence de déploiement massif des réseaux de froid, ce sont les PAC réversibles qui assurent la quasi-totalité de la production de froid. L'enjeu pour ces réseaux est donc d'assurer une complémentarité de distribution avec la filière des PAC, notamment pour limiter l'effet îlot de chaleur en milieu urbain et gérer les contraintes sur le réseau électrique. Les *Tableaux 11* à *13* illustrent le fait que chacun des 4 scénarios se place dans une perspective de déploiement significatif des réseaux de froid, avec des dynamiques fortes à très fortes selon les scénarios.

Concernant le résidentiel, pour le froid, les hypothèses suivantes ont été retenues pour 2050 :

- un taux d'installation de la climatisation dans le logement de 100 %, pour les quatre scénarios, dans le neuf comme dans l'existant, mais un recours à la climatisation moins important dans S1 et S2 du fait de température de consigne plus élevée ;
- un taux de raccordement de 5 à 10 % pour les maisons individuelles et les appartements, en fonction des scénarios ;
- des consommations de climatisation dans le résidentiel de l'ordre de 1,4 TWh (scénarios 1 et 2) à 10 TWh pour les scénarios 3 et 4 *(Tableau 12)*.

Concernant le tertiaire, les consommations de climatisation vont de moins de 5 TWh (S1 et S2) à 15 TWh (S3) et 18 TWh (S4). Par ailleurs, les taux de raccordement aux réseaux de froid dans le tertiaire sont détaillés dans le *Tableau 13*.

Au final, les quantités de froid distribuées par les réseaux dédiés, résidentiel et tertiaire confondus, sont détaillées dans le *Tableau 14*. Pour rappel, en 2020, les réseaux distribuent 1 TWh de froid et les objectifs de la PPE pour 2028 sont entre 1,4 et 2,7 TWh.

Tableau 11 Évolution de la demande dans les scénarios entre 2020 et 2050 pour les réseaux de froid

		TEND	S1	S2	S3	S4
Demande	Résidentiel	+++	+	+	+++	+++
	Tertiaire	+++	+	+	+++	+++

Tableau 12 Besoins totaux de climatisation dans le résidentiel en 2050

Consommation résidentiel	TEND	S1	S2	S3	S4
Maisons individuelles (TWh)	8,2	1,1	1,1	7,3	7,7
Appartements (TWh)	3	0,3	0,4	2,9	2,7
Total résidentiel (TWh)	11,2	1,4	1,5	10,2	10,4

Tableau 13 Taux de raccordement aux réseaux de froid dans le tertiaire en 2050

	TEND	S1	S2	S3	S4
Taux de raccordement aux réseaux de froid (%)	5	10	10	10	10

Tableau 14 *Quantité de froid livrée par les réseaux de froid en 2050 (en TWh)*

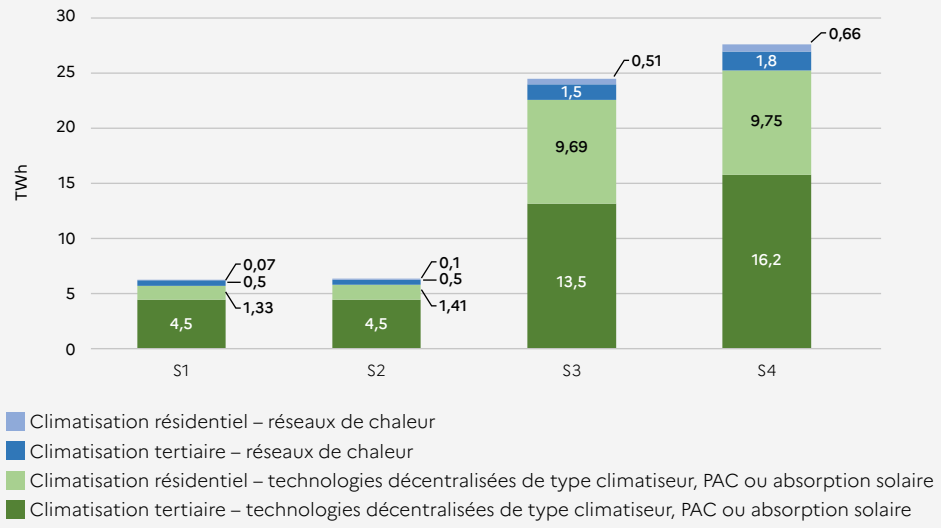
Consommation résidentiel	TEND	S1	S2	S3	S4
Maisons individuelles	0,41	0,06	0,06	0,37	0,39
Appartements	0,21	0,02	0,04	0,15	0,27
Total résidentiel	0,62	0,08	0,10	0,52	0,66
Total tertiaire	1,35	0,50	0,50	1,50	1,80
Quantité totale de froid distribuée par les réseaux	2	0,60	0,60	2	2,50

Les réseaux de froid représenteraient donc, quels que soient les scénarios, de l'ordre de 8 à 9 % des besoins de climatisation identifiés pour le résidentiel et le tertiaire.

Les réseaux de froid reposent sur plusieurs technologies de production :

- **la technologie dite du « groupe froid à compression »**, consiste à prélever de la chaleur dans un milieu à refroidir et la transférer vers un milieu extérieur (eau ou air extérieur). La grande majorité des réseaux de froid actuels sont basés sur ce système ;
- **les thermofrigopompes**, consistent en un dispositif particulier associant des PAC, de sorte que l'énergie utile est à la fois celle rejetée à la source chaude et celle prélevée à la source froide ;
- **les machines à absorption**, basées sur un circuit frigorifique classique similaire à celui des groupes froids à compression (condenseur, détendeur, évaporateur), à la différence près que le compresseur mécanique est remplacé par un système basé sur des réactions chimiques générant la différence de pression permettant au fluide réfrigérant de réaliser le cycle de réfrigération (ce qui requiert un apport de chaleur extérieur et confère son intérêt à cette solution dans le cas d'une valorisation de chaleur de récupération) ;
- **le froid produit par la température naturellement basse et stable du sol**, à quelques mètres de profondeur et extraite dans le cadre d'une installation de géothermie. On parle alors de « géocooling » ou rafraîchissement par un fluide caloporteur directement tempéré par le sol ;
- **le froid produit par un fluide caloporteur** utilisant une source d'eau (lac ou fleuve) pour revenir à une température modérée.

Graphique 21 *Synthèse des scénarios pour les mix énergétiques du froid réseaux et hors réseaux en 2050*



6. Enseignements pour le secteur de la chaleur et du froid, propositions de politiques et mesures

6.1. Enseignements pour les réseaux de chaleur et de froid

Le rythme de développement actuel, illustré par le scénario tendanciel, présente un écart conséquent dans les livraisons de chaleur avec les scénarios les plus ambitieux pour les réseaux notamment S2 et S3, ces scénarios étant pourtant proches d'atteindre les objectifs fixés par la loi pour 2030 (soit une multiplication par cinq des quantités de chaleur et de froid EnR&R livrés entre 2012 et 2030). Du fait d'une rénovation énergétique massive des bâtiments, les livraisons de chaleur dans S1 et S4 se trouvent décalées par rapport à ces objectifs nationaux avec une quantité distribuée en deçà des objectifs actuels de la PPE pour 2028.

Par ailleurs, les mix énergétiques présentés dans chaque scénario prospectif et qui visent des livraisons essentiellement couvertes par des EnR&R à l'horizon 2050 impliquent des efforts importants pour diminuer la part des réseaux de gaz. **La tendance commune à chacun des scénarios est l'accroissement significatif de la biomasse dès 2030, qui continue sa montée en puissance jusqu'en 2050.** Dans une moindre mesure, la géothermie devra également croître pour suppléer les réseaux de gaz (en particulier dans S2 et S3). Les UIOM représentent entre un quart et un tiers de la production suivant les scénarios, même si leur croissance est limitée en comparaison des autres énergies. Les autres énergies renouvelables, telles que la chaleur de récupération, le biogaz et le solaire thermique, gardent une part relativement faible dans le mix énergétique des réseaux de chaleur.

La production de froid, à l'inverse, présente moins de diversité dans les vecteurs énergétiques : l'ensemble des solutions décentralisées de type pompe à chaleur, de même que les solutions « groupe froid à compression » sur lesquelles se base une majorité de réseaux de froid, utiliseront le vecteur électrique. Les enseignements de ces travaux incitent donc surtout, pour les réseaux de froid, à mobiliser au maximum les sources de production d'EnR locales (géocooling) ou de récupération, afin de faire émerger une filière de réseaux de froid alternative et complémentaire aux solutions décentralisées, dont l'impact sur le système électrique et le rôle dans les « îlots de chaleur » urbains sont des enjeux prospectifs majeurs.
De ces enseignements découlent des orientations et mesures à prendre. Les réseaux de chaleur et de froid, en tant que solutions centralisées nécessitant d'importants investissements initiaux et une planification territoriale soutenue, présentent de fortes similitudes sur les contraintes et sur les opportunités de déploiement. Ils nécessitent notamment de forts engagements financiers ou règlementaires de la part de la collectivité, du moins en l'absence de taxation plus marquée sur les énergies fossiles. Bien entendu, leur déploiement présente aussi des possibilités de mutualisation évidentes, puisque les moyens de production, les travaux de voirie ou encore les raccordements peuvent être mis en commun. Par conséquent, les mesures ci-dessous sont globalement communes à ces deux types de réseaux.

Dans la continuité des actions lancées en 2019 par le groupe de travail ministériel sur les réseaux de chaleur et de froid, plusieurs leviers sont utilisables pour atteindre les objectifs de neutralité carbone des réseaux de chaleur tout en couvrant la demande des secteurs résidentiel et tertiaire majoritaire et industriel dans une moindre part. Les mesures présentées ci-après s'inscrivent dans la continuité des 25 actions proposées par [10] et font suite aux recommandations formalisées par la filière dans [9].

Tableau 14 *Propositions de politiques et mesures en faveur des réseaux de chaleur et de froid*

12 MESURES EN FAVEUR DES RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID	
1	Améliorer l'organisation et l'animation du réseau d'acteurs
2	Mieux communiquer sur les atouts socio-économiques et environnementaux des réseaux
3	Améliorer l'accès aux données
4	Mettre en place un plan national de développement des réseaux
5	Investir en R&D : optimisation de la charge du réseau, abaissement des températures de fonctionnement, innovation tarifaire et contractuelle
6	Accélérer le soutien aux réseaux (Fonds Chaleur, financement des collectivités, fonds de soutien à l'investissement local DSIL et DETR, réduction des taux de TVA, prêts bonifiés)
7	Supprimer les aides directes et indirectes aux énergies fossiles et augmenter leur niveau de taxation
8	Simplifier la tarification des réseaux
9	Mieux répartir les coûts d'investissement des réseaux
10	Renforcer les dispositifs de raccordement aux réseaux
11	Porter le classement des réseaux comme principal outil de planification énergétique territoriale
12	Afficher un soutien clair à la chaleur renouvelable dans toutes les lois de politique énergétique

Tout d'abord, d'un point de vue global, 1 **la visibilité et la gouvernance de la filière des réseaux de chaleur et de froid en France peuvent encore être améliorées.** Beaucoup d'acteurs participent au développement de ces réseaux et le développement d'un grand nombre de réseaux de chaleur dits locaux rend plus complexe l'organisation de la filière. Il apparaît ainsi comme prioritaire d'en améliorer l'organisation et l'animation, puis de réaliser un suivi des actions mises en œuvre.

2 **Une communication efficace sur les atouts socio-économiques et environnementaux des réseaux** faciliterait l'adhésion des collectivités, des industriels et du grand public. La maximisation des valeurs sociales et économiques des réseaux favoriserait l'appropriation territoriale par les habitants des enjeux qui entourent les réseaux et pourrait amener à des créations *ex nihilo* en recourant à du financement participatif, comme cela se voit déjà avec les énergies renouvelables électriques.
De plus, 3 **l'amélioration de l'accès aux données sur les réseaux de chaleur et de froid** permettrait aux prescripteurs, aménageurs et promoteurs d'être mieux informés sur la présence de réseaux sur le territoire, les documents d'urbanisme pouvant aider en cela. Ces données permettraient de mieux développer des approches multi-énergies. Par ailleurs, des données de nature économique relatives aux projets faciliteraient l'évaluation de la compétitivité de la filière.

Ces données pourraient aider à 4 **la mise en place d'un plan national de développement des réseaux de chaleur.** Cet outil opérationnel donnerait la priorité aux réseaux vertueux par rapport aux solutions concurrentes, dans les secteurs les plus propices et conformément au rythme fixé au niveau national par les textes règlementaires.

Dans un contexte de recherche de nouvelles ressources d'EnR&R, l'optimisation du réseau et l'abaissement des températures de fonctionnement deviennent des enjeux très forts. Les ressources locales, à basse température, ne peuvent être injectées sur les réseaux de chaleur que si leur niveau de température de fonctionnement le permet (celui-ci dépendant des usages desservis par le réseau). Il s'agit alors de faciliter les échanges d'énergie entre réseaux primaire et secondaire.

Les boucles d'eau tempérées présentent de nombreux atouts techniques, mais font également face à des difficultés (régimes de température peu adaptés à des bâtiments existants notamment), ce qui nécessite des investissements de R&D sur le sujet[19]. 5 Les sujets de recherche prioritaires devraient concerner entre autres **l'optimisation de la charge du réseau et la réduction des pointes de puissance** (*via* le stockage d'énergie, une meilleure gestion du réduit de température et des dispositifs de tarification différenciée), **le développement de sous-stations bidirectionnelles, la mise au point d'outils de gestion prédictifs pour les réseaux, ainsi que l'innovation contractuelle et tarifaire.**

Par ailleurs, les conditions économiques s'appliquant aux réseaux 6 déterminent **la faisabilité de réalisation de nouveaux réseaux comme le taux de raccordement à des réseaux existants**, en particulier dans un contexte concurrentiel qui avantage les énergies fossiles. La mise en place combinée de la TVA réduite pour les réseaux de chaleur vertueux et du Fonds Chaleur ont permis une très nette accélération du développement des projets de réseaux, il serait donc pertinent de l'appliquer aux réseaux de froid. Les financements des collectivités ont également prouvé leur efficacité et l'utilisation du fonds de soutien à l'investissement local peut encore être accrue pour financer les réseaux de chaleur[20] *via* la dotation exceptionnelle de soutien aux opérations d'investissement du bloc communal (DSIL) ainsi que la dotation d'équipement des territoires ruraux (DETR).

Ainsi, le taux de pénétration des réseaux de chaleur et de froid dans le bâti pourrait augmenter en **accélérant le soutien** : hausse du Fonds Chaleur, développement des projets participatifs locaux, hausse des financements régionaux, baisse de la TVA, prêts bonifiés pour les porteurs de projets accordés par les banques publiques.

De plus, 7 il serait efficace d'agir sur la concurrence, notamment en **supprimant toute aide directe ou indirecte aux énergies fossiles[21] et en rehaussant leur niveau de taxation[22]** tout en veillant à accompagner le renforcement des taxes par des mesures d'aides aux ménages précaires.

8 **Une optimisation de la tarification des réseaux de chaleur** est à envisager pour accroître le potentiel de captation de nouveaux usagers. Le prix de la chaleur payée par l'abonné à l'exploitant comprend une part variable qui correspond à l'achat du combustible (R1) et une part fixe (ou abonnement ou R2) qui comprend les dépenses de fonctionnement et d'entretien et l'amortissement des équipements. Or, à titre d'exemple, cette part abonnement peut atteindre 70 % du prix de la chaleur, contre 50 % en moyenne pour les autres moyens de chauffage.

Toujours dans l'objectif d'améliorer la compétitivité des réseaux de chaleur, 9 **une meilleure répartition des coûts d'investissement** d'un projet serait à envisager afin d'alléger la facture du client final et de mieux équilibrer les coûts au sein de la collectivité. En effet, l'ensemble des investissements est aujourd'hui supporté par l'abonné *via* le terme fixe R2, ce qui n'est pas le cas pour certaines productions fossiles décentralisées (le gaz bénéficie d'une péréquation tarifaire). Une telle mesure pourrait améliorer la compétitivité des réseaux de chaleur face aux réseaux de gaz.

En ce qui concerne les dispositifs d'obligation de raccordement introduits il y a plusieurs années, les retours d'expériences montrent qu'ils sont encore perfectibles. 10 Il semble aujourd'hui nécessaire de **mettre en place des mesures règlementaires** qui obligeraient des zones urbaines, des zones d'aménagement concerté ou des opérations de l'Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine à se raccorder à un réseau de chaleur sous conditions, notamment en l'inscrivant dans les documents d'urbanisme. De même, une nouvelle forme d'incitation au raccordement des réseaux de chaleur dans le neuf maximiserait les possibilités de capter de nouveaux abonnés, avec par exemple un seuil maximum sur les émissions de CO_2 à atteindre pour des logements ou des bâtiments tertiaires neufs. Pour les zones non desservies par le réseau de gaz, les réseaux de chaleur pourraient être créés en priorité.

11 **Le classement des réseaux de chaleur**, appelé à se développer avec l'entrée en vigueur des dispositions de la loi énergie-climat de 2019, doit devenir un véritable outil de planification énergétique territoriale, pour améliorer la visibilité de la réalisation de projets de réseaux de chaleur renouvelable et contribuer à l'amélioration des pratiques *via* une concertation renforcée.

Enfin, 12 toutes **les lois relevant des politiques énergétiques devraient afficher un soutien clair et des objectifs ambitieux en matière de chaleur renouvelable**, de façon à maintenir une pression forte sur l'ensemble des acteurs du secteur, ainsi que des élus, des citoyens et des industriels.

19 L'ADEME pilote déjà des sujets de R&D sur les réseaux de chaleur et de froid *via* les appels à projets énergie durable (APRED).
20 Au titre d'actions de rénovation thermique, de transition énergétique, de développement des énergies renouvelables, de contrats de ruralité ou d'investissements dans des bâtiments publics.
21 Aide par les certificats d'économie d'énergie à l'achat de chaudières gaz à condensation ; suppression des mécanismes de récompense des gestionnaires de réseaux de distribution de gaz lorsqu'ils raccordent des bâtiments au réseau de gaz, etc.
22 Système de taxation de l'énergie et du CO_2.

6.2. Enseignements pour la chaleur hors réseaux

Pour satisfaire principalement la demande des secteurs résidentiel et tertiaire et dans une moindre mesure le secteur industriel, plusieurs leviers sont utilisables pour atteindre les objectifs de neutralité carbone de la chaleur et du froid hors réseaux produits par les EnR&R : biomasse, PAC aérothermique, PAC géothermie de surface, solaire thermique et chaleur de récupération.
Plusieurs mesures sont transversales à l'ensemble des filières.

Tableau 15 Propositions de politiques et mesures en faveur de la chaleur et du froid renouvelables hors réseaux

	MESURES TRANSVERSALES AUX FILIÈRES ENR HORS RÉSEAUX
1	Renforcer la communication sur les performances énergétiques et les atouts socio-économiques et environnementaux des différentes technologies
2	Accroître la visibilité et la connaissance de la filière par la mise à disposition de fiches « retours d'expériences » sur les installations existantes
3	Favoriser la montée en compétences des prescripteurs (bureaux d'études, architectes…) et des relais par la mise en place de formations et/ou de compagnonnage adaptés
4	Accélérer le soutien financier aux différentes filières : Fonds Chaleur, financement des collectivités, fonds de soutien à l'investissement local DSIL et DETR, CEE, prêts bonifiés
5	Supprimer les aides directes et indirectes aux énergies fossiles et renforcer les mesures fiscales liées aux émissions de CO_2
6	Afficher un soutien clair à la chaleur et au froid renouvelables dans toutes les lois de politiques énergétiques

Tout d'abord, 1 **une communication efficace**, portée nationalement et localement sur les performances énergétiques (production de chaud et de froid avec les mêmes équipements pour les PAC notamment) et sur les atouts socio-économiques et environnementaux des technologies, faciliterait leur adhésion auprès des collectivités, des entreprises et du grand public [11].

2 Cette communication pourra notamment **mettre en avant des retours d'expériences**, présentant tous les champs des possibles des technologies (production de chaleur, de froid, d'eau chaude sanitaire) et l'ensemble des secteurs concernés (logement individuel et collectif, tertiaire, agricole, industrie…) avec des données chiffrées techniques et économiques.

3 La hausse des demandes d'installations des entreprises, des collectivités et des particuliers, attendue par les différentes filières, devra s'accompagner par **une amélioration de l'offre à la fois quantitative et qualitative par l'ensemble des acteurs concernés.** L'accès à des professionnels qualifiés ne doit pas représenter un frein à l'opportunité de développement de projet. Cela concerne à la fois les prescripteurs, les installateurs et les exploitants et pourra s'appuyer sur des déploiements ambitieux de formations initiales, de reconversions et de compagnonnage. La mise en place et la consolidation de réseaux locaux pour accompagner les maîtres d'ouvrages disposant de peu de moyens humains et d'expertises dédiées pourra faciliter leurs déploiements des solutions renouvelables.

4 **Des aménagements des différents dispositifs de financement** (aides, incitations fiscales…) pourront être mis en œuvre pour accélérer le développement de la chaleur renouvelable hors réseaux. Cela pourra notamment concerner le déploiement du Fonds Chaleur pour accompagner le froid renouvelable produit par les PAC géothermiques (PAC réversibles) ainsi que les projets dont les investissements liés au captage de la ressource sont portés par un tiers investisseur. Cela pourra également concerner la création de nouvelles fiches de certificats d'économie d'énergie permettant notamment le remplacement d'émetteurs de chaleur par des émetteurs basses températures plus adaptés aux PAC et permettant le rafraîchissement par géocooling.

De plus, 5 afin d'améliorer la compétitivité des filières de la chaleur renouvelable hors réseaux notamment vis-à-vis du gaz fossile, il serait efficace de **supprimer toutes les aides directes ou indirectes aux énergies fossiles**[23] **et de rehausser les niveaux de taxation**[24] (tout en veillant à accompagner le renforcement des taxes par des mesures d'aides aux ménages précaires).

Enfin, 6 toutes les lois relevant des politiques énergétiques ainsi que les différents exercices de planification énergétique locale devraient **afficher un soutien clair et des objectifs ambitieux** en matière de chaleur et de froid renouvelable, de façon à maintenir une pression forte sur l'ensemble des acteurs du secteur, ainsi que des élus, des citoyens et des entreprises.

Les mesures listées ci-dessous concernent plus particulièrement la filière des PAC géothermiques et s'inscrivent dans la continuité des travaux pilotés par l'ADEME en 2016 [12].

Tableau 16 Propositions de politiques et mesures en faveur de la chaleur et du froid renouvelables produits par les PAC géothermiques

	MESURES EN FAVEUR DES PAC GÉOTHERMIQUES
1	Améliorer l'organisation et l'animation des réseaux locaux d'acteurs en accélérant le déploiement d'animateurs géothermie dans chaque région
2	Améliorer l'accès des acteurs (foreurs, bureaux d'études, maîtres d'ouvrage…) aux données de potentiel géothermique sur l'ensemble des territoires
3	Investir en R&D (optimisation des COP/fluides frigorigènes des PAC, diminution des coûts de forage, optimisation des équipements de stockage et de production…)

1 La géothermie de surface fait appel à un réseau d'acteurs très diffus (installateurs de PAC, bureaux d'études sous-sol et surface, foreurs, énergéticiens, exploitants…) ce qui rend plus complexe l'organisation de la filière. Il apparaît ainsi comme prioritaire d'améliorer la structuration et l'animation du réseau d'acteurs par **la mise en place d'animateurs géothermie dédiés dans chaque région.**

2 De plus, l'amélioration de l'accès aux données sur les installations existantes de PAC géothermiques et leur potentiel permettraient aux prescripteurs, aménageurs et promoteurs d'être mieux informés et ainsi de développer cette solution quand elle est pertinente.

3 En termes d'investissement en recherche et développement, les sujets prioritaires devraient concerner, entres autres, l'optimisation des COP et fluides frigorigènes des PAC, la diminution des coûts de forage, ou encore l'optimisation des équipements de stockage et de production…

23 Aide par les certificats d'économie d'énergie à l'achat de chaudières gaz à condensation ; suppression des mécanismes de récompense des gestionnaires de réseaux de distribution de gaz lorsqu'ils raccordent des bâtiments au réseau de gaz, etc.
24 Système de taxation de l'énergie et du CO_2.

Tableau 17 Propositions de politiques et mesures en faveur du solaire thermique

MESURES EN FAVEUR DU SOLAIRE THERMIQUE	
1	Améliorer la performance des systèmes et baisser les coûts
2	Développer le couplage avec autres EnR&R et le stockage intersaisonnier
3	Généraliser la mise en place de contrats de performance énergétique (CPE) incluant le solaire

Les mesures listées ci-dessous concernent plus particulièrement la filière du solaire thermique hors réseaux.

La filière doit poursuivre son effort de recherche pour 1 **améliorer la performance des dispositifs de production de chaleur solaire** tout en cherchant une diminution des coûts afin de rendre leurs solutions plus compétitives. Les effets d'échelle obtenus par les grandes installations sont significatifs et démontrent la capacité des solutions solaires à devenir pertinentes lorsqu'elles permettent d'atteindre un coût de la chaleur compétitif pour celui qui l'achète.

Face à la multiplicité des technologies de production de chaleur renouvelable, 2 le solaire doit également être vu comme un composant pertinent dans une approche de mix thermique. **Le couplage de la production solaire, directe ou stockée, avec d'autres sources de chaleur doit donc être mis en avant et renforcé** – que ce soit par un travail sur le développement de régulations intelligentes, ou encore de capacités de pilotage optimisées des installations (notamment par du prédictif). De même, le développement de capacités de stockage de grande envergure doit être encouragé pour une utilisation de la chaleur solaire de manière intersaisonnière, afin de maximiser le recours à cette ressource infinie mais à la forte saisonnalité.

Par ailleurs, 3 **la mise en place de contrats de performance énergétique (CPE)** gagnerait à être systématisée afin de prendre en compte l'exploitant dès la phase de conception d'une installation et permettre de garantir à celui-ci une production solaire sur toute la durée de vie de l'installation. Les CPE fournissent les clauses et conditions pour générer la visibilité sur le coût de la chaleur nécessaire pour favoriser les investissements. Pour cela, les marchés types et contrats d'exploitation actuels devraient être revus pour y inclure le solaire thermique.

Des mesures spécifiques à la filière bois énergie sont listées dans le chapitre *2.3.3. Biomasse énergie*.

7. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs

7.1. Limites de la modélisation des réseaux de chaleur et de froid

L'exercice de modélisation de l'évolution des consommations et du mix énergétique des réseaux de chaleur en France revêt quelques limites, inhérentes à ce type d'exercice, parmi lesquelles :

- en l'absence d'évaluation du développement des réseaux de chaleur et de froid, les réseaux n'ont pas été modélisés un par un : à l'heure actuelle, il n'y a pas eu d'évaluation précise des potentiels de développement des réseaux en France au sein des villes qui ne disposent pas de réseaux ou dans lesquelles des extensions seraient envisageables. Un tel exercice permettrait d'affiner les prévisions de livraisons de chaleur, notamment en prenant en compte les monotones de ces réseaux ;

- la difficulté à estimer le nombre de bâtiments raccordables aux réseaux de chaleur et de froid existants ainsi que leur niveau de consommation : certes, des réglementations et des lois vont fortement conditionner à la baisse les consommations nominales (en MWh par m² par exemple), mais il n'est pas aisé de déterminer dans quelle mesure ces cibles seront atteintes ;

- l'absence d'évaluation économique de la rentabilité des réseaux prenant en compte l'évolution à la baisse des consommations unitaires et l'augmentation du nombre de raccordements nécessaires.

7.2. Limites de la modélisation de la chaleur hors réseaux

L'exercice de modélisation de la chaleur hors réseaux a nécessité l'utilisation de plusieurs modèles également utilisés dans d'autres chapitres (*cf.* chapitres *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*, *2.2.3. Production industrielle*). Il est apparu comme important d'approfondir à l'avenir l'observation et la quantification des sources distribuées et décentralisées de chaleur hors réseaux, encore difficiles à capter à l'heure actuelle. Cela conduirait à pouvoir mesurer de manière fiable les volumes concernés et amènerait à une coordination optimisée des modèles prédictifs.

Les limites des scénarios présentés dans les chapitres *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires* et *2.2.3. Production industrielle* sont également valables ici.

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **FEDENE, SNCU**, *Enquête des réseaux de chaleur et de froid – données 2019*, 2020.

[2] **ADEME**, *Développement des filières réseaux de chaleur et de froid renouvelables en France à horizon 2050*, 2020.

[3] **ADEME**, *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France*, données 2019, 2020.

[4] **ADEME**, *Chiffres clés Climat, air, énergie*, 2018.

[5] **OECD/IEA**, *The Future of Cooling, Opportunities for Energy Efficient Air Conditioning*, 2018.

[6] **SNCU**, *Les Réseaux de chaleur et de froid*, 2021.

[7] **AMORCE**, *Le Stockage thermique dans les réseaux de chaleur*, 2016.

[8] **IEA, DHC**, *International cooperation project focussing on the Integration of Renewable Energy Sources into existing District Heating and Cooling Systems (RES DHC) – Annex TS5: Integration of Renewable Energy Sources into existing District Heating and Cooling Systems*, 2019-2024.

[9] **ADEME**, *Développement des filières réseaux de chaleur et de froid renouvelables en France à horizon 2050 : impacts socio-économiques et environnementaux, stratégie et plan d'actions*, 2020.

[10] **MTES**, Dossier de presse « Réseaux de chaleur et de froid : une filière d'avenir », 2019.

[11] **ADEME, BRGM**, *Géothermie de surface : une énergie performante et durable pour les territoires*, brochure, 2019.

[12] **ADEME**, *Étude sur la géothermie très basse énergie afin de redynamiser la filière dans les secteurs du résidentiel collectif, tertiaire, industriel et agricole*, 2016.

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur

Chaleur réseaux	2015	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Consommation chaleur réseaux résidentiel [TWh]	13,2	19,1	17,8	23,1	31,2	16,6
Consommation chaleur réseaux tertiaire [TWh]	7,7	10,3	7,4	16,1	16,2	9,9
Consommation chaleur réseaux industrie [TWh]	1	5,2	1,2	1,7	4,8	2,3
Total consommation chaleur réseaux [TWh]	**21,9**	**34,6**	**26,5**	**40,9**	**52,2**	**28,8**
Perte réseaux [TWh]	5,4	6,1	4,7	7,2	9,2	5,1
Production chaleur réseaux UIOM [TWh]	7,6	11	7,5	8	10	8
Production chaleur réseaux biomasse [TWh]	4,6	15	17	30	30	16,5
Production chaleur réseaux géothermie [TWh]	1	7	3	4,2	12	4,4
Production chaleur réseaux chaleur fatale [TWh]	0,2	0,7	0,4	0,5	2	0,4
Production chaleur réseaux biogaz [TWh]	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
Production chaleur réseaux solaire thermique [TWh]	0,1	0,8	0,1	0,2	1,2	0,3
Production chaleur réseaux gaz naturel [TWh]	10,7	6	3	5	6	4
Total production chaleur réseaux [TWh]	**27,3**	**40,7**	**31,2**	**48,1**	**61,4**	**33,9**

Chaleur hors réseaux	2015	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Consommation chaleur hors réseaux résidentiel [TWh]	348,6	214,9	148	148,1	178,8	199,8
Consommation chaleur hors réseaux tertiaire [TWh]	137,5	125,1	57,4	52,5	70,4	100,3
Consommation chaleur hors réseaux industrie [TWh]	186,8	187,8	113,9	109,2	129,1	169,4
Total consommation chaleur hors réseaux [TWh]	**672,9**	**527,8**	**319,3**	**309,8**	**378,3**	**469,5**
Production chaleur combustibles liquides (fioul, pétrole, GPL) [TWh]	125,4	25,6	11,2	10,1	9	22,5
Production chaleur hors réseaux électricité [TWh]	113,6	71,8	47,1	47,2	79,1	67
Production chaleur hors réseaux réseau de gaz [TWh]	302,1	253	36,2	49,4	63,3	150
Production chaleur hors réseaux biomasse [TWh]	93,7	56,4	100,2	87,8	50,2	26,8
Production chaleur hors réseaux solaire thermique [TWh]	1	2,3	7,2	9,7	6,2	4,2
Production chaleur hors réseaux géothermie [TWh]	1,6	7,7	8,7	5,1	16,9	23,2
Production chaleur hors réseaux PAC aérothermiques [TWh]	10,8	71,4	62,1	56,2	84,2	112,2
Production chaleur hors réseaux biogaz [TWh]	-	23,5	37,6	27,8	36,8	40,6
Production chaleur hors réseaux charbon [TWh]	11	0,9	-	-	-	1,1
Achat vapeur [TWh]	11	12,6	7,7	8	12,3	17,2
Production chaleur hors réseaux H_2 [TWh]	-	-	-	4,8	11,5	-
Production chaleur hors réseaux déchet [TWh]	2,6	2,7	1,5	2,2	7,1	3,1
Production chaleur hors réseaux biocarburant [TWh]	-	-	-	1,6	1,6	1,6

03 PRODUCTION D'ÉNERGIE

3. Biomasse énergie

1. La biomasse énergie, un enjeu majeur pour la chaleur renouvelable
448

2. Rétrospective des tendances et état actuel
450

3. Méthode et outils de quantification des scénarios
452

4. Stratégies pour le secteur, selon chaque scénario
454

5. La chaleur renouvelable, essentielle à la décarbonation du mix
468

6. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs
470

7. Références bibliographiques
472

8. Annexe : évolution des principales variables du secteur
473

1. La biomasse énergie, un enjeu majeur pour la chaleur renouvelable

La biomasse telle que définie par l'article L. 211-2 du Code de l'énergie correspond à la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.

La biomasse énergie telle que définie dans la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) regroupe à la fois le bois utilisé par les ménages (appareils indépendants de chauffage type inserts, poêles ainsi que les chaudières dans les maisons et les immeubles collectifs), les chaufferies biomasse dans l'industrie, l'agriculture, le collectif et le tertiaire, ainsi que la chaleur renouvelable produite par les cogénérations biomasse et la part renouvelable de la chaleur produite par les unités de valorisation énergétique des déchets urbains. Ce dernier volet n'est cependant pas traité dans la partie prospective du présent chapitre mais dans les chapitres *2.3.2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux* et *2.4.1. Déchets* et n'est donc pas intégré aux différents scénarios de prospective biomasse énergie.

Par ailleurs, **ce chapitre se limite à l'usage de la biomasse solide pour la combustion, pour la production de chaleur renouvelable ou d'électricité**. La biomasse énergie prise en compte dans cette prospective est beaucoup plus large car elle intègre également les usages pour les biocarburants ou le biogaz, traités dans les chapitres *2.3.1. Mix gaz* et *2.3.4. Carburants liquides*.

INDISPENSABLE POUR DOUBLER LA PART DE CHALEUR RENOUVELABLE

La biomasse énergie utilisée en combustion, première énergie renouvelable en France avec près de 45 % de la production d'énergie renouvelable, a un rôle majeur à jouer dans la transition énergétique, en particulier par la production de chaleur. En effet, selon la PPE publiée en avril 2020, la chaleur représente 42 % de la consommation finale d'énergie en 2017, soit 741 TWh, et la chaleur renouvelable représente seulement 21 % de la consommation finale de chaleur à cette date (155 TWh), l'objectif de la loi de transition écologique pour la croissance verte (LTECV) étant de presque doubler cette part pour la porter à 38 % d'ici 2030.

Avec 77 % de la consommation finale de chaleur renouvelable en 2017 (120 TWh [1] sur 155 TWh), la biomasse énergie est de loin la première des sources de chaleur renouvelable. Elle représente 16 % de la consommation finale de chaleur en France.

Dans le secteur collectif/tertiaire, son développement passe par le développement des réseaux de chaleur, outils indispensables pour mobiliser massivement des gisements locaux d'énergie renouvelable et de récupération (EnR&R) non distribuables autrement. Dans l'industrie, l'enjeu est le remplacement de chaudières alimentées en énergies fossiles par des chaudières biomasse.

S'agissant du chauffage au bois domestique, il s'agit de remplacer à un rythme rapide les appareils indépendants de chauffage au bois peu performants (foyers, poêles, inserts) par des équipements plus performants en termes de rendement énergétique et de qualité de l'air, mais aussi d'augmenter le nombre de ménages équipés.

Au-delà de la production de chaleur, la biomasse énergie permet la production d'électricité renouvelable à travers les unités de cogénération. En 2018, la filière des bioénergies (biomasse solide, unités d'incinération d'ordures ménagères et méthanisation) a produit 7,7 TWh d'électricité, permettant de couvrir 1,6 % de la consommation nationale d'électricité.

L'augmentation des capacités installées de production d'électricité à partir de biomasse solide fixée par la PPE est de 210 MWélec pour passer de 590 MWélec en 2016 à 800 MWélec en 2023 en maintenant cette puissance jusqu'en 2028.

Afin d'optimiser la valorisation de la biomasse, la PPE privilégie très nettement un usage chaleur par rapport à la production d'électricité. Le développement des filières de biomasse pour la chaleur et l'électricité comporte par ailleurs d'autres enjeux importants :

- **enjeux environnementaux** :
  - l'atténuation du changement climatique par une réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce à un recours plus faible aux énergies fossiles ;
  - la qualité de l'air : poursuivre le développement et la mise en place des meilleures technologies disponibles est indispensable ; mais aussi, renouveler le parc d'équipements individuels de chauffage au bois vétustes et polluants, généraliser l'usage d'un combustible de bonne qualité et la bonne utilisation des appareils ;
  - la valorisation des cendres, notamment pour des usages agronomiques et matériaux ;

- **enjeux relatifs à la ressource biomasse** :
  - une augmentation du volume de bois récolté en forêt, avec un accroissement de la récolte de bois d'œuvre, permettrait d'accroître les volumes de plaquettes forestières et de connexes de scieries ;
  - une politique compatible avec les enjeux d'adaptation de la forêt au changement climatique (aide à la régénération ou à la plantation des peuplements, amélioration de l'équilibre sylvo-cynégétique…), tout en tenant compte des besoins économiques de la filière ;
  - un développement des industries du bois permettant une meilleure valorisation des bois d'œuvre et une augmentation des connexes de scieries disponibles pour les filières matériaux et énergie ;
  - une plus grande diversification de la ressource (sous-produits agricoles, sous-produits industriels et bois déchet…) ;
  - une meilleure collecte et valorisation des déchets de bois ;
  - une meilleure préparation et valorisation des déchets verts ;

- **enjeux économiques** :
  - la contribution à l'économie locale *via* l'exploitation d'installations et la création d'emplois qui en découlent, la plupart non délocalisables ;
  - la contribution à l'indépendance énergétique du pays et des territoires et à l'amélioration de la balance commerciale grâce à une baisse des importations d'énergies fossiles ;
  - une bonne prévisibilité sur les coûts, les prix de la biomasse étant globalement moins volatiles que ceux des énergies fossiles ;
  - une rentabilité face aux solutions fossiles souvent difficile, en particulier dans le contexte actuel d'un prix bas des énergies fossiles, notamment le gaz dans l'industrie (ce qui est le cas depuis 2014). Dans ces conditions, le développement de la biomasse énergie nécessite des dispositifs de soutien publics tels que le Fonds Chaleur ou le Fonds Décarbonation ou une contribution climat énergie (ou « taxe carbone ») accrue ;

- **enjeux sur les performances énergétiques** : les chaudières biomasse sont des technologies éprouvées à haut rendement énergétique. Il convient néanmoins de poursuivre le développement et la mise en place des meilleures technologies disponibles et d'être vigilant quant à leur dimensionnement et leur bonne exploitation.

Dans le cadre du travail sur la prospective, la thématique biomasse énergie pour la combustion a été scindée en deux grandes catégories, qui ont fait l'objet de scénarios bien distincts :

- **le chauffage au bois destiné au résidentiel** (chauffage au bois domestique et chaudières bois dédiées pour le résidentiel) ;

- **la biomasse énergie pour l'industrie**, le chauffage collectif *via* les réseaux de chaleur et le tertiaire.

2. Rétrospective des tendances et état actuel

2.1. Chauffage au bois résidentiel : diminution de la consommation de bois au profit des granulés

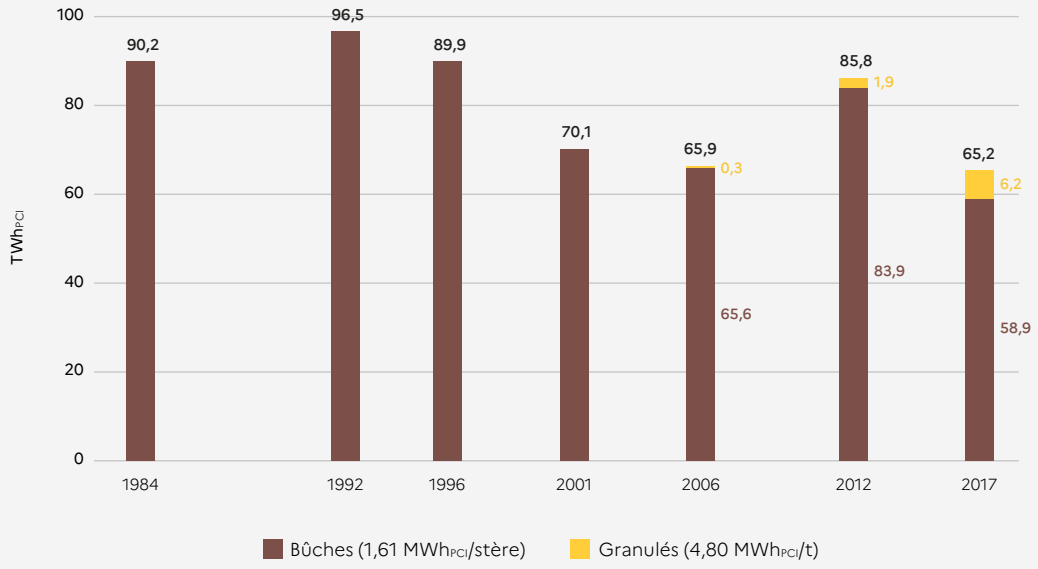
CONSOMMATION DE BOIS POUR LE SECTEUR RÉSIDENTIEL

La consommation réelle de bois baisse globalement depuis 1992, avec une exception en 2012. De façon globale, la consommation pour les maisons individuelles est constante à 65 TWh_{PCI}.
La consommation de granulés, quasi nulle en 2006, atteint 6,2 TWh_{PCI} en 2017 (augmentation moyenne de 32 % par an) et représente 9,5 % de la consommation totale de bois du chauffage domestique.

Ces consommations sont réelles. À climat constant, la consommation de bois pour les maisons individuelles est de 68 TWh en 2017. Celle des immeubles collectifs (plaquettes et granulés) est estimée à 4 TWh à climat constant. Ainsi, **la consommation totale de bois pour 2017 dans le résidentiel est de 72 TWh à climat constant**.

La ressource bois peut provenir de la forêt ou d'espaces non forestiers, comme les vergers ou les haies. 64 % des volumes consommés par les utilisateurs de bûches proviennent de la récolte d'une forêt, soit près de 15 Mm^3 ; 23 % proviennent de l'entretien des vergers ou de haies, soit 5 Mm^3 et 13 % du bois de récupération ou de rebut, soit 3 Mm^3.
Le prélèvement de bois de chauffage est historiquement le premier volume de bois prélevé. Il s'agit essentiellement de feuillus (chêne, châtaignier, charme, hêtre, orme…) et une part moins importante de résineux (pin, sapin…). Ils proviennent des coupes de taillis ou des houppiers (branchages) de bois d'œuvre, ou encore d'arbres inaptes à l'usage bois d'œuvre. Pour les granulés, 1,3 Mt ont été consommées en 2017 (environ 2,5 Mm^3), ce qui reflète une nette augmentation des consommations et du nombre d'utilisateurs par rapport à 2012. Sur la base de la ressource disponible en matière première (plaquettes de scierie, chutes, dosses[1], sciures, rondins écorcés issus de coupes d'éclaircies), la capacité de production française de granulés est estimée à 1,8, voire 2 Mt.

Graphique 1 Évolution de la consommation réelle totale de bois pour le chauffage domestique entre 1984 et 2017
Résidences principales maisons et appartements



Source : [2].

1 Premier et dernier débit obtenus lors du sciage d'une grume.

ÉQUIPEMENTS

En trente ans, le parc des équipements de chauffage au bois a évolué. Suite à une période marquée par le succès des inserts (spécificité française) puis des poêles à bûches, les foyers ouverts sont de moins en moins utilisés. Le nombre de ménages utilisateurs est passé de 5,6 millions en 2001 et 2006 à 6,8 millions en 2017.

PRODUCTION DE BOIS POUR LE SECTEUR DOMESTIQUE

En 2017, la production d'énergie utile à partir du chauffage au bois domestique s'élève à 43 TWh. Cette production a été estimée par l'ADEME à partir du parc de 2017 [2] et à partir des rendements des appareils en usage réels [3].

2.2. Soutien public à l'utilisation dans l'industrie, les réseaux de chaleur et le secteur tertiaire

Jusque dans les années 1990, l'utilisation de la biomasse énergie était essentiellement développée dans les industries liées à la ressource bois (papeterie, industrie du bois). D'après les données CEREN [4], la consommation de biomasse pour des usages énergétiques dans l'industrie était de 12,4 TWh en 1983 et de 16,4 TWh en 1990 (dont respectivement 8,8 et 10,5 TWh dans l'industrie du papier, très majoritaire). Pour 2016, les données CEREN annoncent environ 22,1 TWh (dont 11 TWh en papeterie). C'est à partir des années 1990 que la biomasse énergie pour la combustion prend son essor dans d'autres industries. Il en a été de même pour le chauffage collectif, notamment grâce aux premiers plans bois énergie et à la mise en place de dispositifs d'accompagnement financier.

Le développement s'est accentué à la fin des années 2000, dans un contexte énergétique favorable (hausse des prix des énergies fossiles) et surtout avec la mise en place de dispositifs de soutien public :

- **le Fonds Chaleur opéré par l'ADEME** depuis 2009 qui accompagne le développement des installations de production de chaleur renouvelable et de récupération et la distribution *via* les réseaux de chaleur urbains afin d'alimenter habitat collectif, collectivités et entreprises. Ce fonds a permis l'émergence de chaufferies biomasse industrielles (notamment hors filière bois, par exemple dans l'industrie agroalimentaire) ;
- **les appels d'offres de la CRE (Commission régulation de l'énergie) pour la cogénération biomasse**, notamment dans l'industrie calo-intensive, mais également sur de gros réseaux de chaleur urbains ;
- **la TVA réduite à 5,5 % pour les réseaux de chaleur alimentés *a minima* avec 50 % de biomasse**, de géothermie, d'énergie solaire thermique, de déchets ou d'énergie de récupération (article 278-0 *bis* B du Code général des impôts).

À partir de 2014, le développement de la production de chaleur à partir de biomasse ralentit **du fait d'une baisse durable des prix des énergies fossiles,** en particulier pour l'industrie.

On observe un rebond à partir de 2018 malgré des prix des énergies fossiles toujours défavorables. Cette légère progression peut être attribuée à :

- la contribution climat énergie en hausse progressive avant son gel en 2019 ;
- des subventions en augmentation ;
- l'émergence de quelques projets d'envergure, notamment dans l'industrie, avec une place accrue de l'approvisionnement en bois déchet ou en sous-produits industriels, à travers l'appel à projet BCIAT de l'ADEME ou les appels d'offres cogénération biomasse de la CRE.

La filière biomasse collectif/industrie affiche aujourd'hui un retard important par rapport à l'objectif 2023 de la PPE [1].

3. Méthode et outils de quantification des scénarios

MÉTHODE GÉNÉRALE

La construction des différents scénarios pour la biomasse énergie se base sur un équilibrage entre l'offre (ressources biomasse disponibles) et la demande (besoins énergétiques des différents secteurs : industrie, réseaux de chaleur et tertiaire hors réseaux de chaleur).

Les modélisations des scénarios ont été menées par itération :

- pour assurer la cohérence globale entre différents secteurs (industrie, réseaux énergétiques…) ;
- pour assurer la cohérence des mix énergétiques des différents secteurs ;
- avec des contrôles de cohérence sur la disponibilité de la ressource biomasse (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*).

Pour chaque scénario, l'offre et la demande varient selon un certain nombre d'hypothèses. Ainsi, la demande dépend de la sobriété et de l'efficacité énergétique ainsi que des autres composantes du mix énergétique de chaque secteur. L'offre, ressource globale disponible pour la biomasse énergie, dépend d'hypothèses concernant :

- **les systèmes forestiers et agricoles** pour les ressources directement issues de la forêt ou de l'agriculture (telles que la plaquette forestière) ;
- **les usages et chaînes de transformation biomasse/bois** (déchets de bois ou produits connexes de l'industrie) ;
- **la répartition entre usages matériaux et énergétiques de la biomasse** (combustion directe appelée ici « biomasse énergie », méthanisation et biocarburants).

3.1. Méthode pour le chauffage au bois résidentiel

La production globale d'énergie dans les logements à partir de bois tient compte de son évolution historique, de la philosophie des différents scénarios et des ressources de bois disponibles par catégorie : bûches, granulés et plaquettes.

Les données de référence pour 2015 et 2020 ont été extrapolées. En effet, l'ADEME disposait de données pour 2017. Une première simulation des consommations à 2050 a été établie à partir de l'évolution du parc d'appareils et de leurs consommations unitaires. Les consommations globales de bois pour ce secteur ont été ensuite réajustées avec le bilan de ressources biomasse (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). À partir des données de 2017, la répartition des ressources du chauffage au bois résidentiel (forêt, vergers…) prise en compte sur cet exercice prospectif a été fixée comme constante, basées sur des données de 2017 de façon pérenne.

Dans cet exercice prospectif, l'outil ANTONIO, qui intègre les hypothèses de rénovation énergétique des logements de chaque scénario, a permis de simuler l'évolution des consommations et le nombre d'équipements de chauffage, ECS (Eau Chaude Sanitaire) et autres équipements des logements pour toutes les énergies. L'outil a donc calculé à partir des consommations de bois de 2050, le nombre d'équipements pour le bois dans le résidentiel.

Enfin, la production d'énergie à partir de bois a été calculée à l'aide des rendements sur PCI suivants[2] *(Tableau 1)*.

Tableau 1 Rendements des appareils de chauffage au bois selon l'année d'installation pour tous les scénarios

Rendements en 2050	Avant 2030	Entre 2030 et 2040	Après 2040
Foyers ouverts	15 %	15 %	15 %
Poêles, inserts ou cheminées à foyer fermé à bûches	75 %	80 %	83 %
Chaudières à bûches	75 %	80 %	83 %
Poêles à granulés	85 %	90 %	95 %
Chaudières à granulés	95 %	100 %	105 %

2 En considérant qu'à partir de 2040 les chaudières sont à condensation, soit un rendement supérieur à 100 % en PCI.

Pour les années 2015 et 2020, le travail prospectif prend pour base les données ADEME 2017 [2] au lieu des données SDES/CEREN [5] (données extrapolées à partir de données de 2013).

Dans le cadre de ce travail prospectif, la consommation nationale de bois dans le résidentiel inclut les maisons individuelles, les immeubles collectifs et les logements secondaires et couvre le chauffage et l'ECS. L'étude [2] portant uniquement sur les systèmes de chauffage et ECS des résidences principales, cela explique la différence de consommation de bois entre les deux exercices.

3.2 Méthode pour la biomasse énergie dans l'industrie/réseaux de chaleur/tertiaire

TYPOLOGIES DE COMBUSTIBLES

S'agissant de la ressource (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*), huit grandes typologies de combustibles sont considérées dans les scénarios biomasse énergie industrie/réseau de chaleur/tertiaire, à savoir :

- plaquettes forestières ;
- plaquettes bocagères ou agroforestières, plaquettes paysagères ligneuses et déchets verts ;
- connexes des industries du bois ;
- bois d'emballages SSD[3] ;
- déchet de bois[4] ;
- granulés ;
- sous-produits agricoles ;
- sous-produits industriels et autres.

TYPOLOGIES D'INSTALLATIONS

Deux grandes typologies d'installations sont considérées dans les scénarios biomasse énergie industrie/réseau de chaleur/tertiaire :

- les installations biomasse destinées uniquement à la production de chaleur (chaufferie biomasse chaleur) ;
- les installations biomasse destinées à la fois à la production de chaleur et d'électricité (cogénération biomasse).

CAPACITÉS ET LIMITES TECHNIQUES DES INSTALLATIONS

La biomasse énergie est une filière mature, dont le développement s'est accentué depuis la fin des années 2000. Les installations utilisent des technologies éprouvées qui offrent des performances élevées d'un point de vue énergétique. Il existe néanmoins des marges d'amélioration sur les rendements notamment grâce :

- au développement des systèmes de récupération d'énergie des fumées, dont celles des systèmes de condensation ;
- à des installations toujours mieux conçues et exploitées.

Pour les différents scénarios, une hausse du rendement de production de 5 % a été prise en compte pour les installations de production de chaleur biomasse par rapport à la situation actuelle, soit une hypothèse de rendement énergétique moyen de 90 % en 2050.

Sur les installations de cogénération biomasse, des hypothèses d'amélioration des performances énergétiques ont également été prises en compte dans les différents scénarios :

- augmentation de rendement moyen électrique, de 30 % actuellement à 33 % en 2050 ;
- augmentation de l'efficacité énergétique moyenne, de 60 % actuellement à 85 % en 2050 grâce à de nouvelles installations de cogénération systématiquement dimensionnées en fonction des besoins de chaleur.

TYPOLOGIES D'USAGES

Deux grandes typologies d'usages sont considérées dans les scénarios biomasse énergie industrie/réseau de chaleur/tertiaire, selon que la chaleur produite par des installations biomasse énergie est :

- utilisée en usage direct, pour répondre directement à un besoin de chaleur d'un process industriel ou au besoin de chauffage de bâtiments, dans le tertiaire (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) ou l'industrie (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*) ;
- injectée sur des réseaux de distribution de chaleur, pour répondre à un besoin chaleur dans le résidentiel, le tertiaire ou l'industrie (*cf.* chapitre *2.3.2. Froid et chaleur réseaux et hors réseaux*).

3 Les bois en fin de vie utilisables selon la rubrique règlementaire 2910-A des ICPE : bois d'emballage en fin de vie ayant fait l'objet d'une sortie de statut de déchets (SSD).
4 Les bois en fin de vie utilisables selon la rubrique règlementaire 2910-B des ICPE ; les déchets de bois non dangereux à traiter selon la rubrique règlementaire 2771 des ICPE (traitement thermique) ; les déchets de bois classés dangereux à traiter selon la rubrique 2770 des ICPE (traitement thermique).

4. Stratégies pour le secteur, selon chaque scénario

4.1. Scénarios chauffage au bois résidentiel

4.1.1. Scénario tendanciel : la baisse de consommation se poursuit

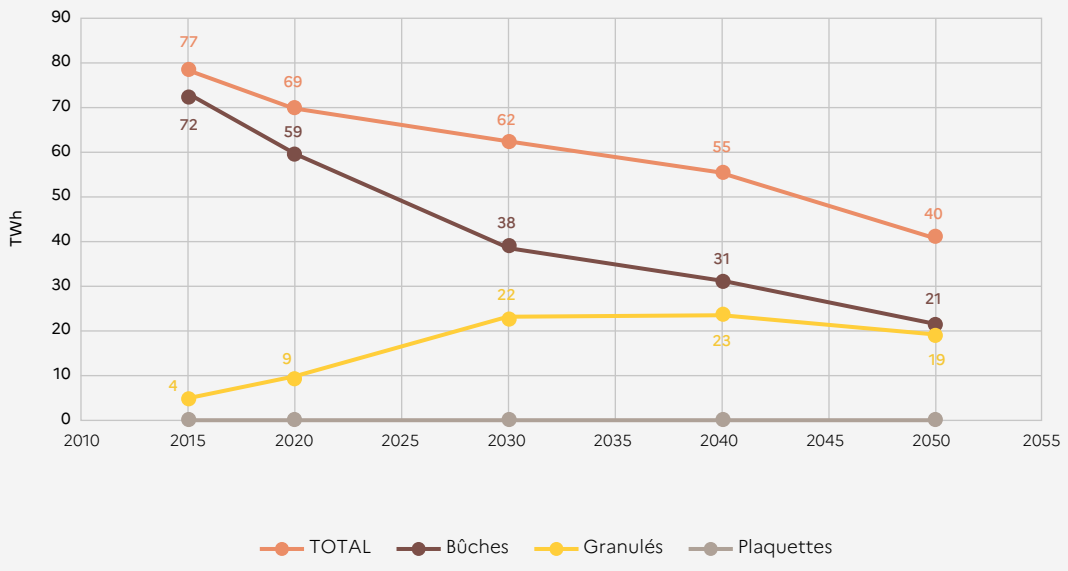
CONSOMMATIONS *(Graphique 2)*

En 2017, l'ADEME a observé une baisse de la **consommation nationale de bois** [2]. Dans le scénario tendanciel (TEND), cette baisse se poursuit dans la mesure où la baisse de la consommation de bois bûche (suppression des foyers polluants) n'est pas compensée par les granulés et où il n'est pas prévu de changement drastique de politique d'aide financière à cette énergie. Malgré des actions pour renouveler le parc, il restera certains systèmes non performants, qui seront interdits à l'usage. Les enjeux liés à la qualité d'air vont donc s'accentuer, alimenter les controverses et donner une image négative de cette énergie. Pour autant, elle sera toujours plébiscitée dans les zones rurales et les zones moins sujettes aux polluants atmosphériques en raison de son faible coût et de son abondance. De plus, les appareils à granulés dont l'alimentation est automatique vont poursuivre leur développement, tant pour les chaudières que pour les poêles. Ainsi, à climat constant, il est prévu en 2050 une consommation de bois de 40 TWh.

La **consommation de bûches** devrait connaître la baisse la plus forte, entraînant une diminution de la consommation globale de bois pour le résidentiel. Cette baisse est entraînée par des réglementations qui pénalisent les systèmes de chauffage manuels et par des controverses sur la qualité d'air.

A contrario, la **consommation de granulés** devrait continuer à augmenter pour atteindre des niveaux pratiquement équivalents à la consommation de la bûche en 2050. L'engouement actuel pour ce combustible devrait se poursuivre jusqu'en 2030, les utilisateurs de bûches se tournant vers les granulés. Néanmoins, un seuil devrait être atteint vers 2030. En effet, les systèmes de chauffage à bûches ont des atouts que n'offrent pas les systèmes de chauffage à granulés : indépendance à l'électricité, quasi-gratuité du bois dans le cas d'auto-approvisionnement.

Graphique 2 Évolution de la consommation de bois résidentiel par catégorie à l'horizon 2050 dans le scénario tendanciel



NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS AU BOIS EN MODE PRINCIPAL

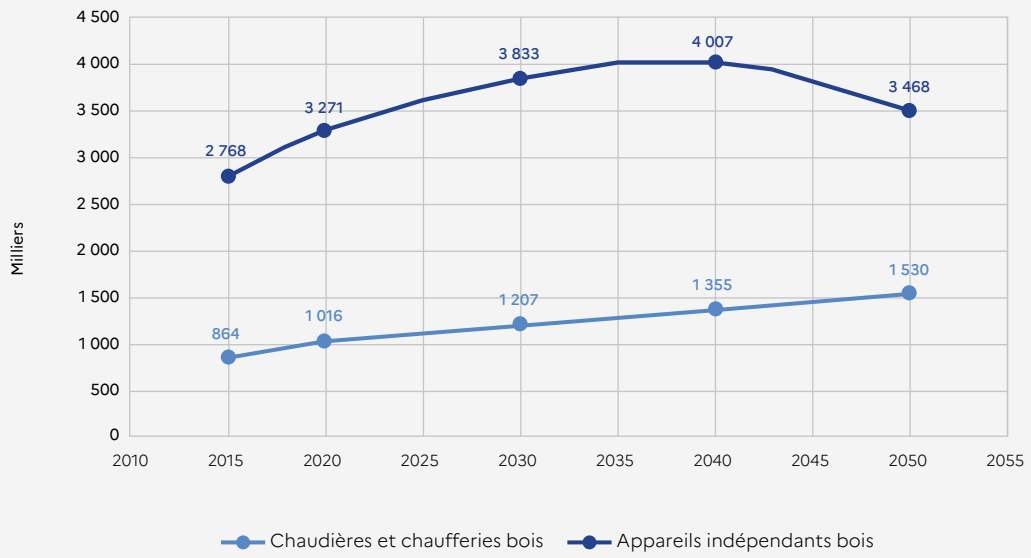
Le **nombre de systèmes de chauffage au bois** utilisés augmenterait grâce à l'attrait de cette énergie renouvelable. Cela est notamment vrai pour les systèmes à granulés, dont la demande croît fortement, que ce soit pour les poêles ou pour les chaudières.

La légère baisse du nombre de poêles à granulés expliquée précédemment se retrouve sur *(Graphique 3)*, avec la baisse du nombre d'appareils indépendants à partir de 2040. En 2045, les chaudières à granulés sont toutes à condensation.

PRODUCTION D'ÉNERGIE

Avec un rendement moyen du parc à 84 % en 2050, la production d'énergie du chauffage au bois résidentiel dans le scénario tendanciel s'élève à 33,6 TWh.

Graphique 3 Évolution des matériels de chauffage au bois à l'horizon 2050 dans le scénario tendanciel



4.1.2. Comparaison des quatre scénarios

CONSOMMATIONS DE COMBUSTIBLE BOIS DANS LE RÉSIDENTIEL *(Graphique 4)*

Le scénario 1 correspond à une continuité des tendances des objectifs de la PPE en vigueur, à savoir : consommation nationale de bois constante et augmentation du nombre de ménages se chauffant au bois. Dans ce scénario, les résultats de la PPE sont obtenus grâce au remplacement des appareils anciens par des appareils neufs au rendement nettement plus élevé, à la sobriété des particuliers qui permet de diminuer les consommations de chaque logement, au mode de vie proche de la nature et du « faire soi-même », qui s'accompagnent d'un attrait pour le combustible bois bûche.

La consommation de bois dans les autres scénarios est inférieure à celle du S1.

En effet, S2 est celui de la sobriété, de l'efficacité et de la diversité de production énergétique par les énergies renouvelables (EnR) locales. Le bois bûche est concurrencé par les autres EnR.

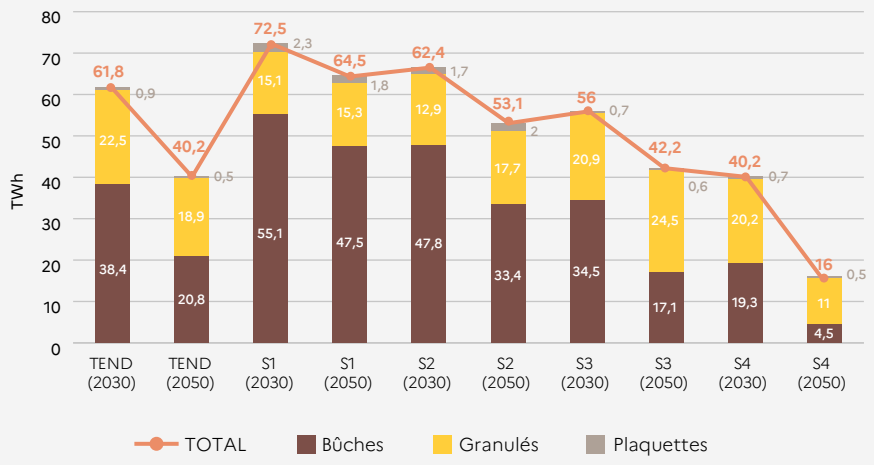
S3 est celui d'une offre énergie décarbonée, avec un parc électrique largement déployé dans les logements, agrémenté d'un peu de bois énergie résidentiel. La consommation nationale de bois en 2050 du S3 est quasiment identique à celle du scénario tendanciel.

Enfin, S4 est axé vers les innovations poussées à l'extrême. Les systèmes de chauffage au bois, notamment bûche, n'ont pas leur place dans ce scénario à côté des autres énergies. La consommation de bûches chute considérablement jusqu'à devenir quasi inexistante. Quelques systèmes subsistent avec la microcogénération.

Toute estimation d'une baisse de consommation globale de bois résulte essentiellement de la forte diminution de **consommation de bois bûche**, qui passe de 72 TWh en 2015 à 47 TWh en 2050 à climat constant dans S1.

La tendance d'augmentation de la **consommation de granulés** se vérifie dans tous les scénarios. Les consommations maximales de granulés atteignent environ 24 TWh dans S3 dont le mode de vie favorise les chaudières à granulés.

Graphique 4 Consommation de bois en 2030 et 2050 dans les différents scénarios



NOMBRE D'ÉQUIPEMENTS AU BOIS UTILISÉS EN CHAUFFAGE PRINCIPAL *(Graphique 5)*

En 2015, 3,6 millions d'équipements au bois sont utilisés comme énergie de chauffage principal. Dans le scénario tendanciel, ce chiffre augmenterait à 5 millions en 2050.

Dans S1, le nombre d'équipements de chauffage principal en 2050 pourrait plus que tripler par rapport à 2015. Avec un scénario 2 basé sur des politiques publiques fortes pour le développement des EnR locales, le nombre d'équipements des ménages utilisateurs de bois utilisés en mode principal augmenterait à presque 10 millions en 2050.

S3, avec une offre d'énergie décarbonée (électricité et un peu de chauffage au bois résidentiel), permettrait de maintenir quasiment constant le nombre d'équipements.

Enfin, dans S4, cette énergie est peu utilisée, ce qui explique le faible nombre d'équipements concernés.

Selon les scénarios, l'évolution du nombre d'équipements au bois comme chauffage principal montre une poursuite de l'augmentation ou de la baisse. Seul le scénario tendanciel présente une légère baisse du nombre d'utilisateurs à partir de 2040, comme expliqué précédemment.

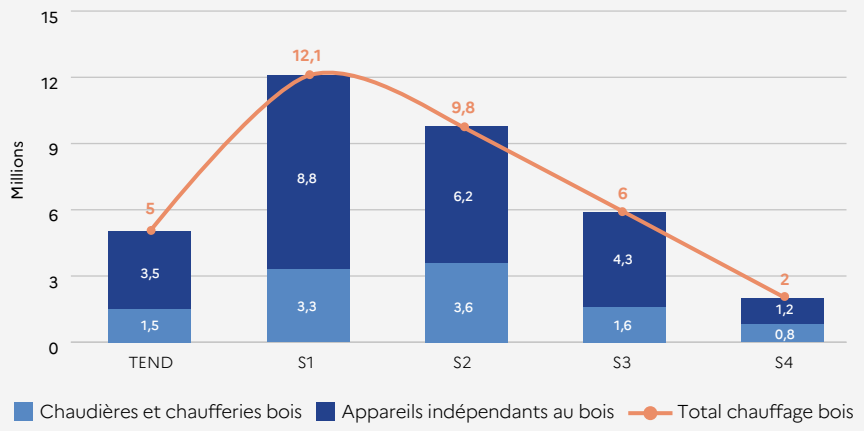
PRODUCTION D'ÉNERGIE *(Graphique 6)*

Dans les scénarios TEND et S1, les appareils sont remplacés par des appareils performants. Le rendement moyen du parc français augmente de 66 % en 2017 à 84 % en 2050. Dans S2 et S3, des efforts supplémentaires sont réalisés sur la qualité des produits et les particuliers se tournent plus vers les systèmes de chauffage à granulés, ce qui se traduit par un rendement moyen du parc de 86,5 % en 2050. Dans S4 où le bois énergie pour le chauffage résidentiel est peu utilisé, le rendement du parc est identique à celui de TEND et S1.

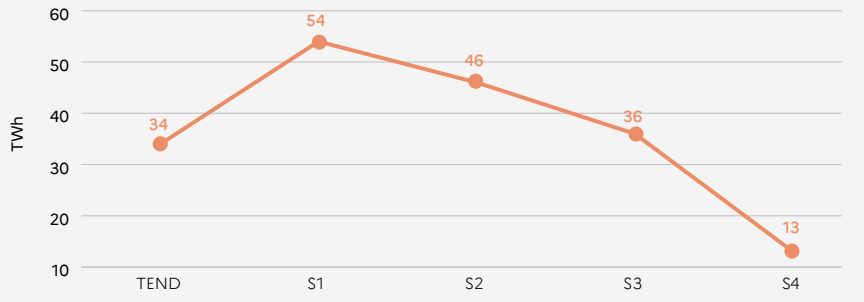
De ces rendements résulte l'estimation de production d'énergie à partir de bois pour le résidentiel en 2050.

Par rapport aux 43 TWh de 2017, la production d'énergie diminue pour les scénarios TEND, S3 et S4. Elle augmente dans S1 à 54 TWh car le bois est l'énergie plébiscitée. Dans S2, la production est constante par rapport à 2017 car les particuliers font le choix d'utiliser massivement les EnR locales.

Graphique 5 Nombre d'équipements de chauffage au bois utilisés en mode principal dans tous les scénarios



Graphique 6 Production d'énergie à partir de bois dans le résidentiel dans les différents scénarios



4.2 Industrie, réseaux de chaleur et tertiaire

Selon les scénarios, différents leviers sont activés de façon plus ou moins importante, pour calculer la demande énergétique des différents secteurs ou de la typologie des installations. Le *Tableau 2* fait la synthèse de ces principaux leviers et des évolutions pour chaque scénario de la consommation de biomasse et de la production de chaleur.

Tableau 2 Synthèse des principaux leviers activés pour la biomasse énergie dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans les différents scénarios

		TEND	S1	S2	S3	S4
Évolution de la consommation en biomasse		+	++	+++	++	+
Évolution de la production de chaleur		+	++	+++	+	+
Évolution de la demande	Réseau de chaleur	+	+	+++	+++	+
	Industrie	+	+++	+++	-	+
	Tertiaire (hors RC)	=	-	-	-	=
Évolution des typologies d'installations	Chaufferie biomasse chaleur seule (hors cogénération)	+	+++	+++	++	+
	Cogénération biomasse	+	+	++	++	+

4.2.1 Scénario tendanciel : Croissance modérée de la chaleur biomasse énergie

Le scénario tendanciel prolonge sans rupture les tendances observées actuellement.

La consommation ainsi que la production de chaleur biomasse énergie augmentent donc, mais à un rythme modéré. Pour rappel, le rythme observé actuellement sur le développement de la biomasse énergie est nettement inférieur à celui nécessaire pour atteindre les objectifs PPE de 2023 et 2028.

Ainsi, par rapport à la situation actuelle, le scénario tendanciel se traduit par une augmentation de 47 % de la consommation de biomasse et de 61 % sur la production de chaleur en 2050.

La structure de ce scénario est marquée par :

- une augmentation de la consommation et de la production de chaleur ;
- une augmentation de la production de chaleur dans le secteur industriel et, plus encore, à destination des réseaux de chaleur (+ 8,6 TWh contre + 6,15 TWh pour l'industrie) ;
- la chaleur produite par des installations hors cogénération augmente et reste très majoritaire. Le développement des installations de cogénération biomasse est modéré.

CONSOMMATION DE BIOMASSE *(Graphique 7)*

Le scénario tendanciel montre une consommation de biomasse en augmentation relativement linéaire, avec une consommation estimée à **50,80 TWh en 2050** et un point de passage à 44 TWh en 2030, soit une hausse d'environ 47 % entre 2017 et 2050.

Les consommations restent majoritairement destinées au secteur de l'industrie, avec près de 60 % en 2050, même si la part de consommation de biomasse à destination des réseaux de chaleur augmente pour atteindre 37 % en 2050 (+ 10 points par rapport à 2017).

Les consommations biomasse restent très majoritairement à destination de chaufferies biomasse hors cogénération à plus de 65 % en 2050.

PRODUCTION DE CHALEUR *(Graphique 8)*

Le scénario tendanciel montre une production de chaleur en augmentation relativement linéaire, avec une production estimée à **39 TWh en 2050**, et un point de passage à 31 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 61 % entre 2017 et 2050.

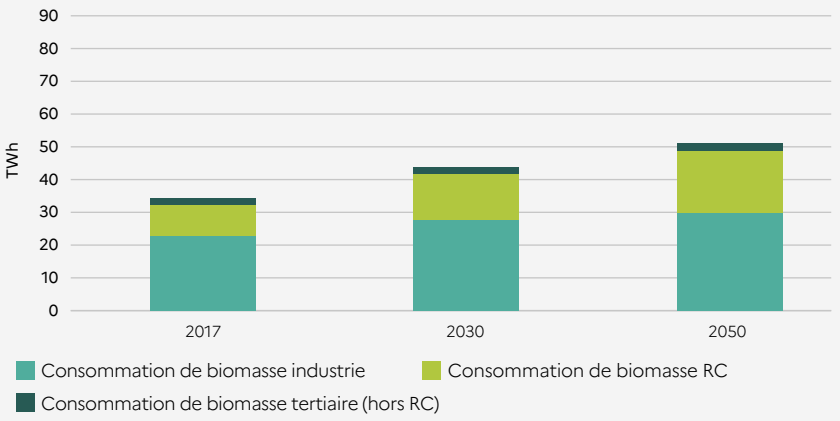
La production de chaleur reste majoritairement à destination du secteur de l'industrie, à près de 57 % en 2050, même si la part de consommation de biomasse à destination des réseaux de chaleur augmente pour atteindre 39 % en 2050 (+ 12 points par rapport à 2017).

Elle est essentiellement produite par des chaufferies biomasse hors cogénération, qui représentent près de 76 % du parc en 2050.

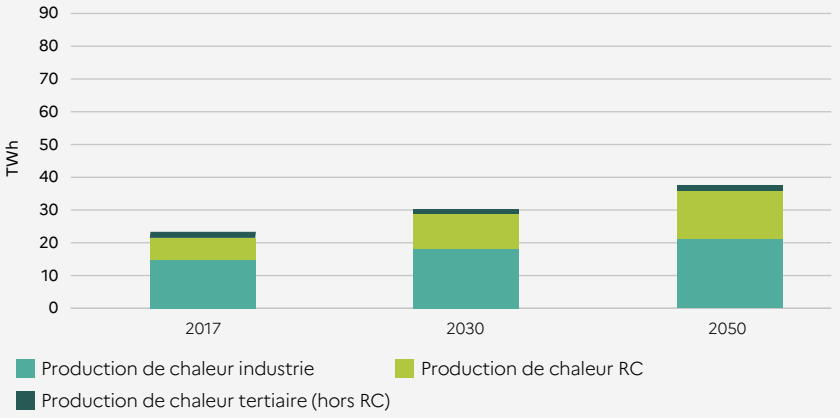
Les réseaux de chaleur restent très majoritairement alimentés par des chaufferies biomasse hors cogénération. Il en est de même pour la chaleur produite à partir de biomasse pour l'industrie, même si la part de la chaleur par cogénération augmente à près de 30 % en 2050 (soit + 15 points par rapport à 2017).

Les cogénérations biomasse se développent de façon modérée avec une augmentation d'environ 200 MW électriques installés en 2050 par rapport à la situation actuelle. La meilleure efficacité énergétique des cogénérations permet néanmoins une valorisation nettement accrue de la chaleur, majoritairement à destination de l'industrie.

Graphique 7 Consommation de biomasse énergie dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans le scénario tendanciel



Graphique 8 Production de chaleur à partir de biomasse dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans le scénario tendanciel



4.2.2. Scénario 1 : baisse de la demande énergétique globale mais doublement de la consommation de biomasse énergie

Le scénario 1 est guidé par une demande énergétique globale en forte baisse dans le cadre d'une politique de sobriété à l'échelle nationale. Cependant, afin de renforcer le mix d'énergies renouvelables en valorisant une ressource locale et renouvelable, la consommation de biomasse et la production de chaleur augmentent par rapport à la situation actuelle.

Ainsi, comparativement à la situation actuelle, la consommation de biomasse augmente de 100 % en 2050 et celle de production de chaleur de 130 %.

La structure de ce scénario résulte des choix suivants :

- une augmentation de la demande en chaleur biomasse des réseaux ;
- une augmentation de la demande en chaleur biomasse pour l'industrie ;
- un développement très modéré des installations de cogénération biomasse ;
- une hausse de la ressource biomasse disponible pour répondre à celle des besoins en biomasse énergie.

CONSOMMATION DE BIOMASSE *(Graphique 9)*

La consommation de biomasse augmente pour atteindre **69,2 TWh en 2050** avec un point de passage à 62 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 100 % entre 2017 et 2050.
Les consommations restent essentiellement destinées au secteur de l'industrie, avec près de 67 % en 2050, bien que la part de consommation de biomasse à destination des réseaux de chaleur augmente pour atteindre 31 % en 2050 (+ 3 points par rapport à 2017). La très grande majorité des consommations demeure à destination de chaufferies biomasse hors cogénération, avec près de 74 % en 2050.

PRODUCTION DE CHALEUR *(Graphique 10)*

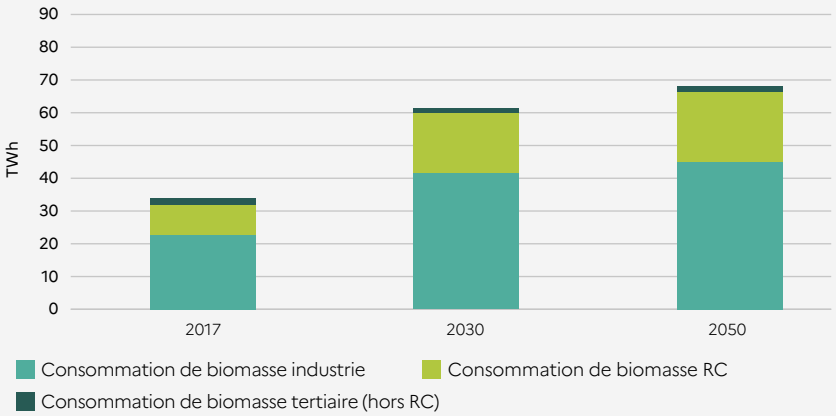
La production de chaleur augmente de façon relativement linéaire pour atteindre **55,4 TWh en 2050** avec un point de passage à 47,6 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 130 % entre 2017 et 2050.
La production de chaleur reste majoritairement destinée au secteur de l'industrie à près de 66 % en 2050, même si la part de production de chaleur à destination des réseaux de chaleur augmente pour atteindre 31 % en 2050 (+ 4 points par rapport à 2017).

La très grande majorité de la production de chaleur (près de 83 % en 2050) provient des chaufferies biomasse hors cogénération. Celle à destination des réseaux de chaleur progresse de 165 %. Les réseaux de chaleur restent très majoritairement alimentés par des chaufferies biomasse hors cogénération.

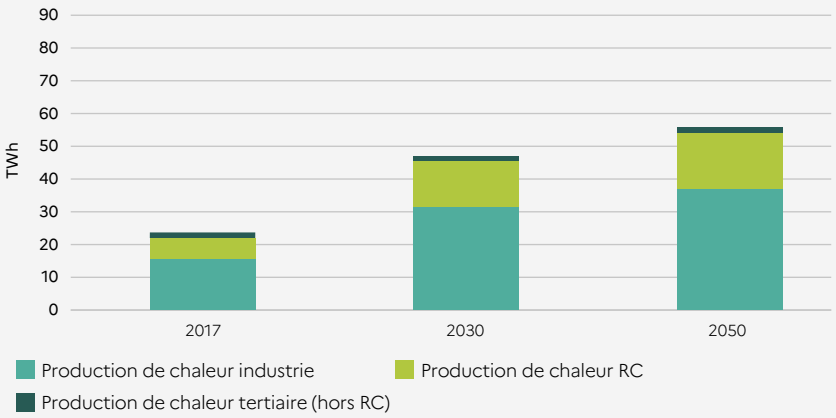
La production de chaleur à destination des industries augmente de 132 %. La chaleur produite à partir de biomasse pour l'industrie reste majoritairement issue des chaufferies biomasse hors cogénération, bien que la part de la chaleur par cogénération augmente à près de 18 % en 2050 (soit + 2 points par rapport à 2017).

Les cogénérations biomasse se développent, avec environ 200 MW électriques supplémentaires installés en 2050 par rapport à la situation actuelle. La meilleure efficacité énergétique des cogénérations permet néanmoins une valorisation nettement accrue de la chaleur, qui reste majoritairement destinée à l'industrie.

Graphique 9 Consommation de biomasse énergie dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S1



Graphique 10 Production de chaleur à partir de biomasse dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S1



4.2.3. Scénario 2 : le plus ambitieux pour le développement de la biomasse énergie

Le scénario 2 est également guidé par une démarche de sobriété, moins importante toutefois que dans S1. La consommation de biomasse et la production de chaleur augmentent fortement par rapport à la situation actuelle.

Ainsi, la consommation de biomasse augmente de 148 % en 2050 et la production de chaleur de 178 % par rapport à la situation actuelle.

Parmi les différents scénarios étudiés, il s'agit du scénario le plus ambitieux en termes de développement de la biomasse énergie.

La structure de ce scénario résulte des choix suivants :

- une très forte augmentation de la demande en chaleur des réseaux de distribution de chaleur ;
- une forte augmentation de la demande en chaleur pour l'industrie ;
- un développement modéré des installations de cogénération biomasse ;
- une forte hausse de la ressource biomasse disponible pour répondre aux besoins en biomasse énergie également en hausse.

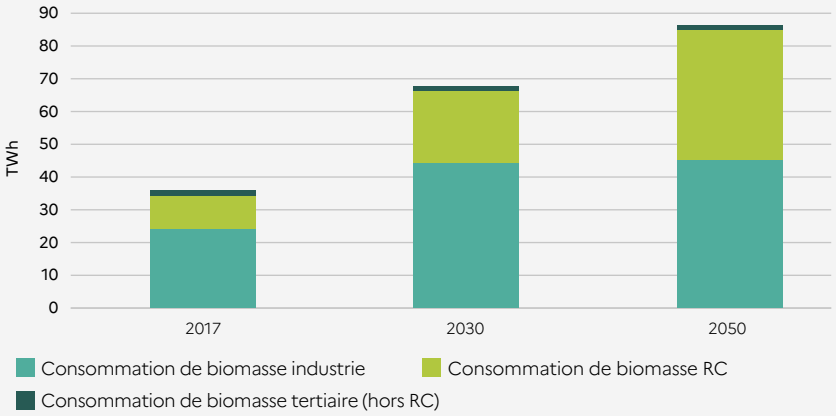
CONSOMMATION DE BIOMASSE *(Graphique 11)*

La consommation de biomasse augmente pour atteindre **85,9 TWh en 2050** avec un point de passage à 67,7 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 148 % entre 2017 et 2050.

Les consommations restent majoritairement à destination du secteur de l'industrie (53 %), bien que l'on observe un rééquilibrage avec les réseaux de chaleur (45 %). La part de consommation à destination des réseaux de chaleur est en forte hausse : + 17 points par rapport à 2017.

Les consommations restent très majoritairement à destination de chaufferies biomasse hors cogénération, à plus de 68 % en 2050.

Graphique 11 Consommation de biomasse énergie dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S2



PRODUCTION DE CHALEUR *(Graphique 12)*

La production de chaleur est en forte augmentation et relativement linéaire, pour atteindre **66,9 TWh en 2050** avec un point de passage à 52,7 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 180 % entre 2017 et 2050.

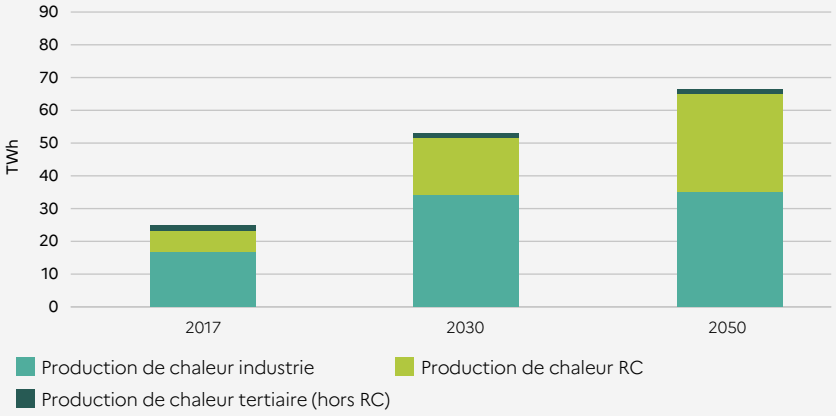
Un peu plus de la moitié (53 %) de la production de chaleur reste destinée au secteur de l'industrie en 2050, bien que la part de production de chaleur à destination des réseaux de chaleur augmente fortement pour atteindre 45 % en 2050 (+ 18 points par rapport à 2017).

La production de chaleur reste très majoritairement issue par des chaufferies biomasse hors cogénération, à près de 79 % en 2050. Celle à destination des réseaux de chaleur est en forte augmentation, avec une production qui progresse de 367 %. Les réseaux de chaleur restent très majoritairement alimentés par des chaufferies biomasse hors cogénération.

La production de chaleur à destination des industries est également en progression, de 122 %. La chaleur produite à partir de biomasse pour l'industrie reste majoritairement issue des chaufferies biomasse hors cogénération, bien que la part de la chaleur par cogénération augmente à près de 23 % en 2050 (soit + 5 points par rapport à 2017).

Les cogénérations biomasse se développent avec une augmentation d'environ 600 MW électriques installés en 2050 par rapport à la situation actuelle. L'amélioration de l'efficacité énergétique des cogénérations permet une valorisation nettement accrue de la chaleur majoritairement à destination de l'industrie.

Graphique 12 Production de chaleur à partir de biomasse dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S2



4.2.4. Scénario 3 : l'innovation au service de la décarbonation et des renouvelables

Le scénario 3 s'inscrit dans une dynamique d'évolution par l'offre, avec un déploiement important de solutions innovantes pour répondre aux enjeux de décarbonation et de développement des énergies renouvelables. L'électrification des procédés est massive, en particulier dans l'industrie. Ces éléments conduisent à une demande globale en biomasse énergie significativement réduite sur ce secteur. Contrairement aux précédents scénarios, la répartition de l'utilisation de la biomasse énergie par secteur évolue en profondeur par rapport à la situation actuelle.

Ainsi, la consommation de biomasse augmente de 84 % entre aujourd'hui et 2050 et la production de chaleur de 95 %.

La structure de ce scénario résulte des choix suivants :

- une très forte augmentation de la demande en chaleur des réseaux de distribution de chaleur ;
- une baisse de la demande en chaleur pour l'industrie ;
- un développement modéré des installations de cogénération biomasse ;
- une hausse de la ressource biomasse disponible en réponse à celle des besoins en biomasse énergie.

CONSOMMATION DE BIOMASSE *(Graphique 13)*

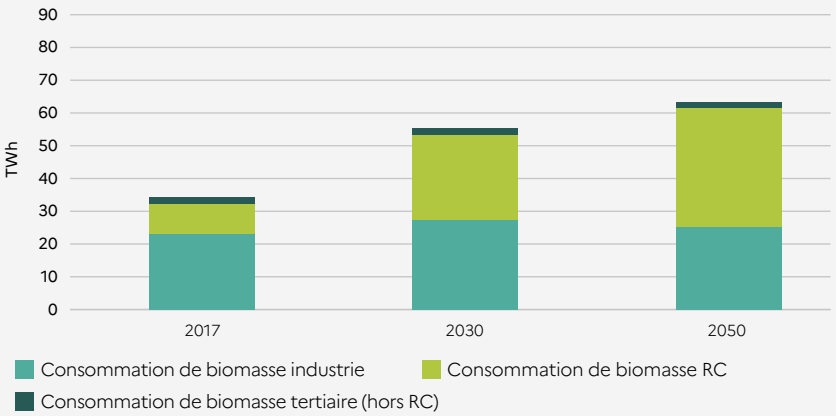
La consommation de biomasse augmente pour atteindre **63,6 TWh en 2050** avec un point de passage à 55,4 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 84 % entre 2017 et 2050.

Contrairement aux scénarios TEND, S1 et S2, les consommations biomasse sont majoritairement à destination du secteur des réseaux de chaleur (58 %), dont la part augmente de 30 points par rapport à 2017. Celles destinées à l'industrie est en baisse de 27 points, à 39 % en 2050.

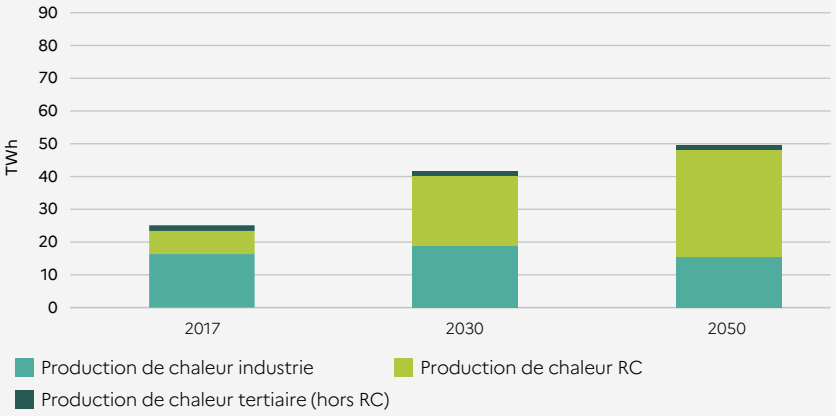
PRODUCTION DE CHALEUR *(Graphique 14)*

La production de chaleur est en forte augmentation et relativement linéaire pour atteindre **49,90 TWh en 2050** avec un point de passage à 41,4 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 95 % entre 2017 et 2050.

Graphique 13 Consommation de biomasse énergie dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S3



Graphique 14 Production de chaleur à partir de biomasse dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S3



Suivant la tendance de la consommation de biomasse, la production de chaleur est majoritairement à destination des réseaux de chaleur (64 %), dont la part augmente de 37 points par rapport à 2017. Celle destinée à l'industrie est en baisse de 33 points, avec seulement 33 % en 2050.

La production de chaleur reste très majoritairement produite par des chaufferies biomasse hors cogénération, à près de 57 % en 2050.

La production de chaleur à destination des réseaux progresse de 367 %. Les réseaux de chaleur restent très majoritairement alimentés par des chaufferies biomasse hors cogénération.

Par rapport à la situation actuelle, la production de chaleur à destination des industries est en légère baisse à 2050 (- 4 %), malgré une légère hausse en 2030. Contrairement aux autres scénarios, la chaleur produite à partir de biomasse pour l'industrie provient majoritairement de cogénération biomasse (65 %).

Les cogénérations biomasse se développent avec environ 600 MW électriques installés supplémentaires en 2050 par rapport à la situation actuelle. L'amélioration de l'efficacité énergétique des cogénérations autorise une valorisation accrue de la chaleur à destination de l'industrie.

4.2.5. Scénario 4 : forte électrification et recours massif à la compensation

Le scénario 4 s'inscrit dans une dynamique où la sobriété n'est pas recherchée. Les leviers pour parvenir à la neutralité carbone sont principalement la compensation par le déploiement massif des solutions technologiques, comme le captage et le stockage de carbone. Comme dans S3, l'électrification des procédés est forte en particulier dans l'industrie.

Ainsi, la consommation de biomasse augmente de 58 % en 2050 et celle de production de chaleur de 75 % comparativement à la situation actuelle.

Parmi les différents scénarios étudiés, c'est, après le scénario tendanciel, le moins ambitieux en termes de développement de la biomasse énergie.

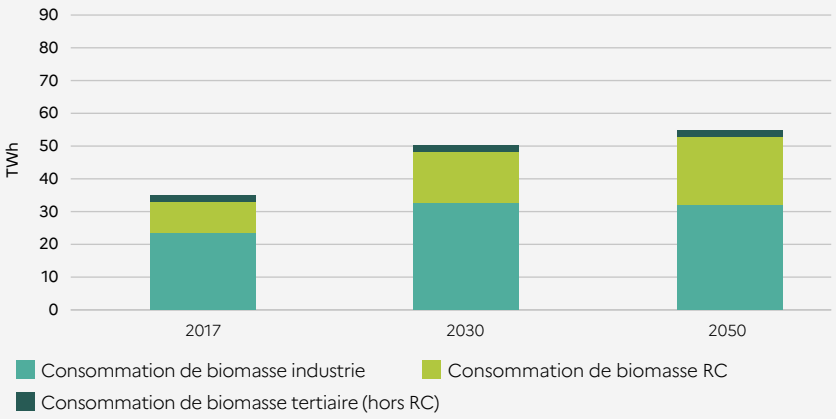
La structure de ce scénario résulte des choix suivants :

- une augmentation modérée de la demande en chaleur des réseaux ;
- une augmentation modérée de la demande en chaleur pour l'industrie ;
- un développement modéré des installations de cogénération biomasse ;
- une ressource biomasse disponible en hausse pour répondre à la hausse des besoins en biomasse énergie.

CONSOMMATION DE BIOMASSE *(Graphique 15)*

La consommation de biomasse augmente pour atteindre **54,4 TWh en 2050** avec un point de passage à 49,9 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 58 % entre 2017 et 2050.

Graphique 15 Consommation de biomasse énergie dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S4



PRODUCTION DE CHALEUR *(Graphique 16)*

La production de chaleur augmente fortement pour atteindre **42,17 TWh en 2050** avec un point de passage à 36,53 TWh en 2030, soit une augmentation d'environ 75 % entre 2017 et 2050.

La production de chaleur reste majoritairement le fait de l'industrie, à près de 56 % en 2050, même si la part de production de chaleur à destination des réseaux augmente.

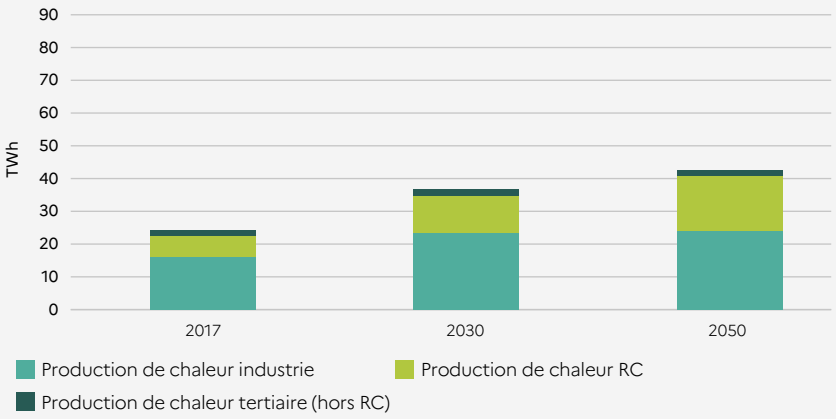
La production de chaleur reste très majoritairement produite par des chaufferies biomasse hors cogénération, à près de 67 % en 2050.

La production de chaleur à destination des réseaux progresse de 157 % soit de façon plus modérée que dans S2 et S3. Les réseaux restent très majoritairement alimentés par des chaufferies biomasse hors cogénération.

La production de chaleur à destination de l'industrie augmente, de façon également plus modérée que dans S1 et S2, en hausse d'environ 51 % par rapport à la situation actuelle. La chaleur produite à partir de biomasse pour l'industrie reste majoritairement issue des chaufferies biomasse hors cogénération, bien que la part de la chaleur par cogénération augmente avec près de 28 % en 2050 (soit + 12 points par rapport à 2017).

Les cogénérations biomasse se développent avec environ 200 MW électriques supplémentaires installés en 2050 par rapport à la situation actuelle. L'amélioration de l'efficacité énergétique des cogénérations permet une valorisation nettement accrue de la chaleur, majoritairement à destination de l'industrie.

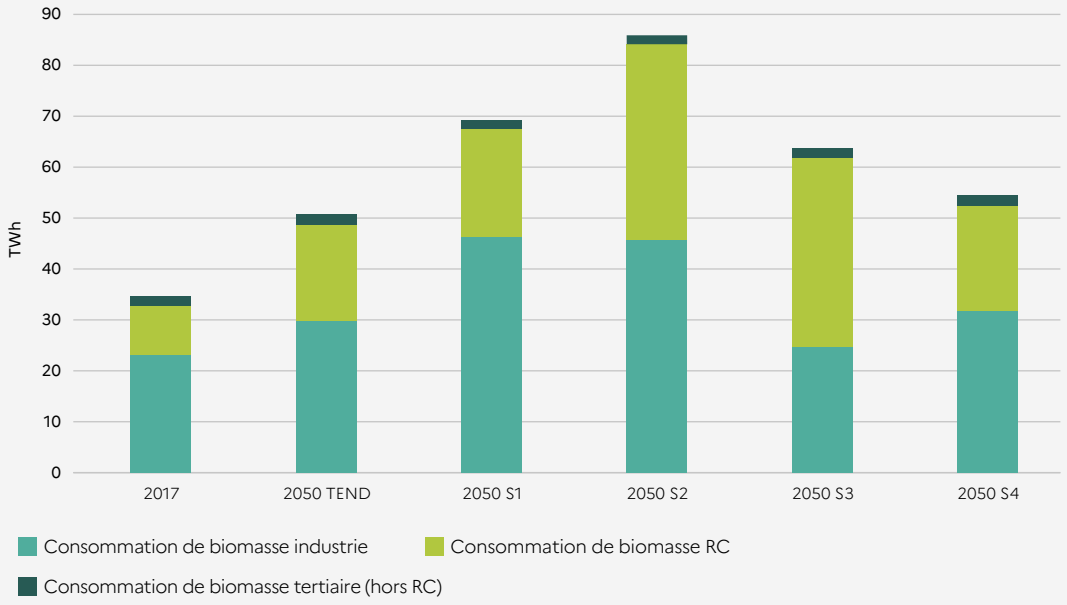
Graphique 16 Production de chaleur à partir de biomasse dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans S4



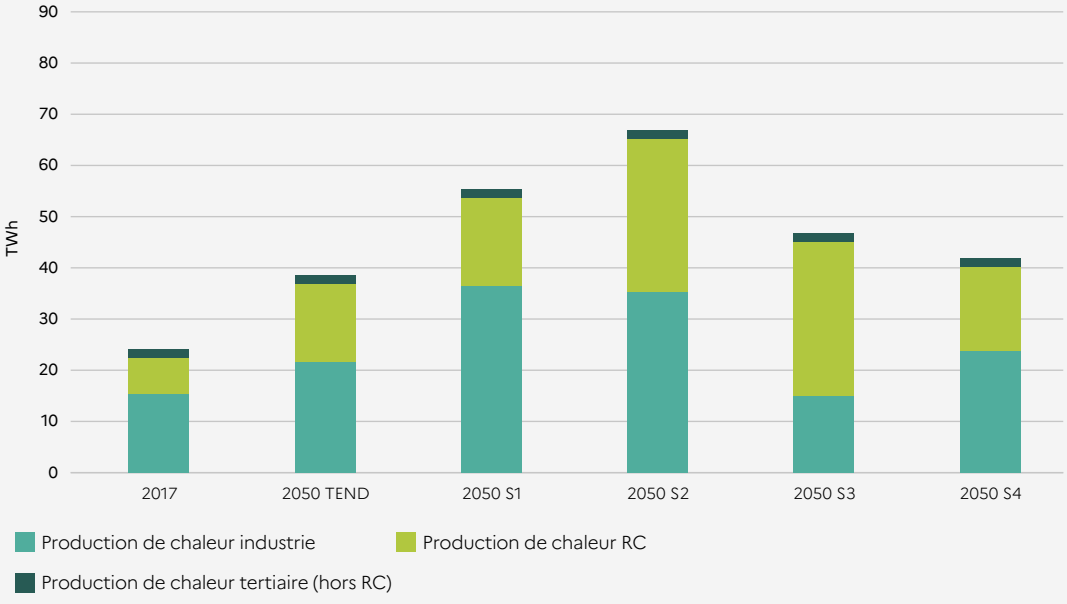
4.2.6. Comparaison des scénarios

Dans tous les scénarios, la consommation de biomasse et la production de chaleur sont en hausse par rapport à la situation actuelle. Pour les principaux secteurs que sont l'industrie et les réseaux de chaleur, la demande en biomasse énergie augmente plus ou moins suivant les scénarios sauf dans S3 où l'industrie est en légère baisse par rapport à la situation actuelle.

Graphique 17 Consommation de biomasse énergie dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans les différents scénarios



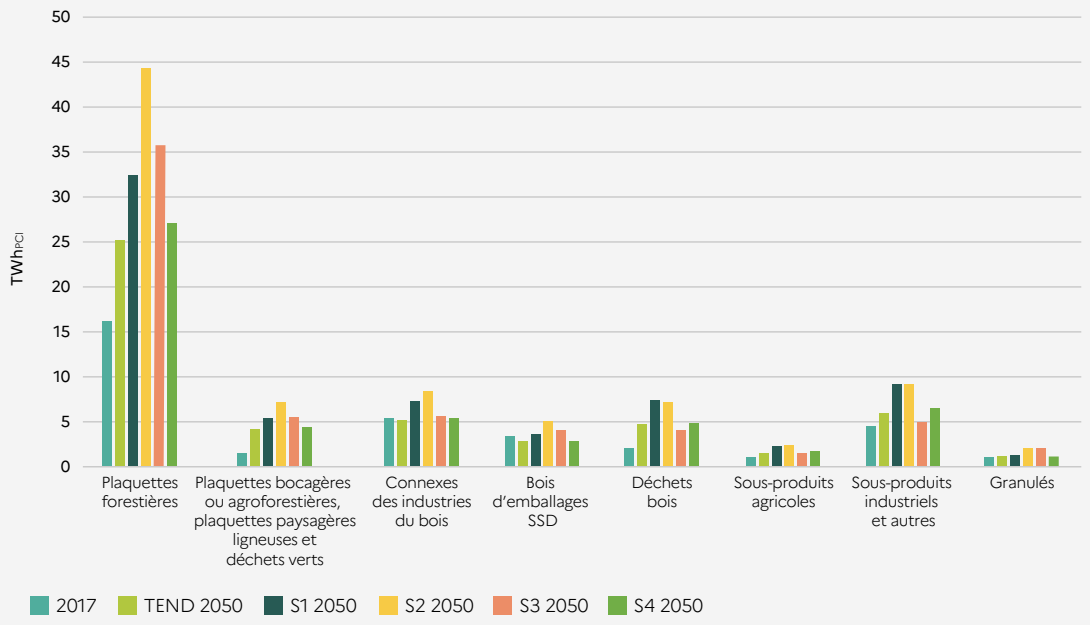
Graphique 18 Production de chaleur à partir de biomasse dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC) dans les différents scénarios



Le *Graphique 19* présente la consommation de biomasses par combustible en 2017 et pour les différents scénarios à 2050. On observe que :

- **le gisement de plaquettes forestières** reste le gisement supplémentaire le plus disponible, les différents scénarios reposent majoritairement sur cette ressource, même si son coût reste relativement élevé ;
- **l'utilisation de la ressource « plaquettes bocagères ou agroforestières, plaquettes paysagères ligneuses et déchets verts »** est en augmentation sur les différents scénarios. Il s'agit d'une ressource à faible coût et détenue majoritairement par les collectivités ;
- **l'utilisation des connexes des industries du bois** repose sur des volumes globalement stables ou en légère augmentation sur les différents scénarios. Le surplus éventuel du gisement de connexes sera absorbé par le développement de la filière granulés ;
- **l'utilisation des bois d'emballages** reste sur des volumes globalement stables pour les différents scénarios ;
- **l'utilisation des déchets de bois**, à travers une amélioration de la collecte, est en augmentation pour l'ensemble des scénarios, en particulier dans S1 et S2 ;
- **l'utilisation des sous-produits agricoles** reste à un niveau faible pour l'ensemble des scénarios ;
- **l'utilisation des sous-produits industriels** est relativement stable dans S3 et S4. En revanche, elle est en nette augmentation dans S1 et S2 dans lesquels la consommation vers l'industrie est la plus importante ;
- **l'utilisation des granulés** est en augmentation sur l'ensemble des scénarios, avec un développement essentiellement sur les installations collectives de petites/moyennes puissances (globalement inférieures à 1 MW). L'utilisation du granulé reste marginale sur les installations de fortes puissances.

Graphique 19 Consommation de biomasses par combustible pour les différents scénarios dans l'industrie, le tertiaire et les réseaux de chaleur (RC)



5. La chaleur renouvelable, essentielle à la décarbonation du mix

La biomasse énergie est aujourd'hui la première énergie renouvelable en France et joue un rôle majeur dans la transition énergétique et la décarbonation du mix énergétique, principalement à travers le développement de la chaleur renouvelable.

CHAUFFAGE AU BOIS RÉSIDENTIEL : MAINTENIR DES POLITIQUES PUBLIQUES DE SOUTIEN

Le développement de la chaleur renouvelable nécessite de maintenir à un niveau important l'énergie issue du bois pour le résidentiel. Dans S2, S3 et S4, la consommation globale de bois est néanmoins plus faible que celle prévue par la PPE du fait de la **forte diminution de la consommation de bois bûche. Cette chute de la consommation entraînerait une chute du taux d'EnR dans le mix énergétique français**. Pour contrebalancer cette baisse, des politiques publiques plus ambitieuses en faveur du chauffage au bois résidentiel ou d'autres EnR devront être poursuivies.

Les politiques publiques à mettre en place devraient se baser sur un indicateur de **production d'énergie du chauffage au bois résidentiel** (intégrant les rendements énergétiques) au lieu de la consommation de bois. Cela traduirait mieux les efforts réalisés par les fabricants pour augmenter le rendement des appareils de chauffage et ceux des ménages pour renouveler leurs équipements vétustes. Cet indicateur traduirait également les efforts des ménages pour diminuer les consommations d'énergie de leur logement. Ainsi, pour la révision de la PPE, l'ADEME recommande que les objectifs fixés pour le chauffage au bois résidentiel soient basés sur la production d'énergie plutôt que sur la consommation de bois. L'indicateur consommation de bois pourrait, quant à lui, être conservé dans les bilans globaux sur la ressource bois.

Par ailleurs, la qualité de l'air étant une préoccupation majeure de ce secteur en raison d'un parc actuel ancien et polluant, les actions doivent se poursuivre pour réduire les émissions de particules. **Le renouvellement du parc va permettre de réduire fortement les quantités de polluants émis** (*cf.* feuilleton à venir sur les impacts sur la qualité de l'air). Ces réductions seront d'autant plus importantes qu'elles seront accompagnées par la mise en œuvre de bonnes pratiques (qualité du combustible, gestion du feu[5], entretien) et d'un dimensionnement de l'appareil adapté au besoin. La diffusion d'informations et la sensibilisation du grand public faciliteront la mise en place de ces actions.

Enfin, **aucun des scénarios ne prévoit la nécessité d'importer les granulés pour répondre à la hausse de la consommation**. Il sera donc possible de conserver une énergie française à partir de la ressource du territoire national. Néanmoins, faute d'un coût maîtrisé des granulés français, il n'est pas impossible de voir des acteurs préférer un combustible granulé étranger moins onéreux.

INDUSTRIE/RÉSEAU DE CHALEUR/ TERTIAIRE : PROGRESSION DE LA BIOMASSE ÉNERGIE DANS TOUS LES SCÉNARIOS

Les différents scénarios développés pour la biomasse énergie dans les secteurs industrie/réseau de chaleur/tertiaire confortent **son rôle majeur dans la transition énergétique et la décarbonation des mix énergétiques**. En effet, tous les scénarios proposent un développement ambitieux de la biomasse énergie dans ce secteur.

Pour l'ensemble des scénarios, ce développement passe principalement par celui des réseaux de distribution de chaleur, outil indispensable à la massification de la chaleur renouvelable, notamment celle produite à partir de biomasse. Le développement de la biomasse énergie dans l'industrie est très hétérogène d'un scénario à l'autre, d'autant moins important que les scénarios misent sur l'électrification des procédés industriels.

Sur l'ensemble des scénarios, les cogénérations biomasse connaissent un développement modéré, avec une priorité globale donnée à la production de chaleur seule hors cogénération, ce qui favorise une plus forte efficacité énergétique globale.

5 Gestion du feu : utilisation du foyer en mode nominal ou réduit, gestion des entrées d'air, pratiques d'allumage.

UNE LARGE PALETTE DE POLITIQUES DE SOUTIEN DISPONIBLES

Le soutien de politiques publiques semble indispensable au développement de la filière biomasse énergie.

La compétitivité économique de la biomasse énergie face aux énergies fossiles, en particulier le gaz naturel, sera l'une des clés pour réussir son développement massif. Les politiques de soutien susceptibles de favoriser cette compétitivité peuvent prendre différentes formes :

- **des soutiens à l'investissement**, tels que ceux pratiqués aujourd'hui dans le cadre du Fonds Chaleur ;
- **des aides aux fonctionnement** permettant de sécuriser le montage financier du projet, avec par exemple un principe d'aide flottante en fonction de prix de référence des énergies fossiles, comme cela est pratiqué aujourd'hui dans le cadre du Fonds Décarbonation de France Relance ;
- **des compléments de rémunérations** ou tarifs d'achat pour l'électricité produite à partir des cogénérations biomasse ;
- **des mesures fiscales** telles que des taux de TVA réduits, par exemple sur l'achat de combustibles biomasse ou sur les réseaux de distribution de chaleur EnR ;
- **un prix du carbone plus élevé**, à travers une contribution climat plus solidaire, donc plus acceptable.

Les réglementations environnementales peuvent également jouer un rôle important dans le développement de la filière, en maintenant un haut niveau de performance, avec néanmoins la nécessité de conserver une pertinence technico-économique. Les principales réglementations concernent à ce jour :

- **la qualité de l'air** ;
- **la valorisation des cendres** ;
- **la durabilité de la ressource biomasse.**

Pour atteindre la pertinence technico-économique des installations biomasse énergie, différents leviers devront être mobilisés :

- **une optimisation des coûts de production**. Il est indispensable de poursuivre le développement de projets fiables et optimisés dans leur fonctionnement, synonymes de coûts maîtrisés et donc d'un impact direct et positif sur les coûts de production dans le temps ;
- **des politiques de soutien à l'innovation**. La filière est mature, néanmoins des innovations peuvent être pertinentes pour permettre des gains de performances énergétiques et environnementales.

6. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs

CHAUFFAGE AU BOIS RÉSIDENTIEL : PRISE EN COMPTE INSUFFISANTE DU PRIX DES AUTRES ÉNERGIES

La principale limite de ce secteur porte sur **l'imprécision liée à la consommation de bois bûche**. Cela est valable quelle que soit la méthodologie employée : enquêtes auprès des ménages ou enquêtes de quantité de bois en sortie de forêt (études SDES/CEREN [5], Agreste [6], ADEME [2]). En effet, l'unité utilisée est le stère, qui est imprécise car sa définition diffère selon les acteurs (forestier, approvisionneur ou utilisateur). Par ailleurs, le stock de bois consommé sur l'hiver en cours est mal connu des ménages et la majorité d'entre eux se procure le bois hors circuits professionnels. Il est donc courant d'accepter une marge d'erreur de 10 % sur la consommation de bois en résidentiel. Au regard de cette marge d'erreur, 69 TWh en 2020 comparés à 65 TWh en 2050 dans S1 reviennent à une quasi-stabilité de la consommation de bois. Cette imprécision sur le chauffage au bois résidentiel induit des incertitudes significatives en termes de production de chaleur.

L'autre limite de cet exercice prospectif résulte du fait que **la variation de la production de bois en résidentiel en fonction du coût des énergies n'a pas été prise en considération**. Le chauffage résidentiel au bois est utilisé en chauffage principal et sa part s'accroît de façon continue avec une part de chauffage d'appoint non nulle. La production de bois pour cet usage varie en fonction du coût de l'autre énergie de chauffage qu'elle soit fossile ou électrique. Il a été observé par le passé, qu'elle augmente à mesure que les coûts du gaz, de l'électricité ou du fioul progressent. Or, il n'a pas été possible dans cet exercice prospectif, de faire varier la production de bois en résidentiel en fonction du coût des énergies. Cela pourra être réalisé lors d'un prochain exercice prospectif.

BIOMASSE ÉNERGIE – INDUSTRIE/ RÉSEAUX DE CHALEUR/TERTIAIRE : LES OBJECTIFS DE LA PPE NE SONT PAS ATTEINTS

L'une des principales limites des scénarios est l'état du parc de chaufferies biomasse en 2017. Il est difficile d'obtenir une vision précise de l'état actuel du parc existant des chaufferies biomasse, en particulier la consommation globale de biomasse et la production de chaleur.

Le Comité Interprofessionnel du Bois Énergie (CIBE) estime le parc de chaufferies dans le collectif, le tertiaire et l'industrie en 2017 à environ 6 300 installations (> 50 kW), pour 7 900 MW de puissance thermique et environ 22,30 TWh de production thermique renouvelable [7].

D'après les données du SDES [5], on peut estimer en 2017 la production thermique du parc de chaufferies dans le collectif, le tertiaire et l'industrie à environ 32 TWh en retirant la part de chaleur renouvelable des usines d'incinération des ordures ménagères estimée à 6 TWh.

Dans le cadre de ces travaux, en prenant en compte les besoins respectifs des différents secteurs – industrie, réseaux de chaleur et tertiaire – en 2017, on obtient une production de chaleur biomasse d'environ 24,1 TWh.

La comparaison avec les objectifs PPE de production de chaleur biomasse est également une des limites des scénarios. En effet, les résultats des différents scénarios aboutissent en 2050 à des niveaux moins ambitieux que ceux de la PPE à 2028. Il y a plusieurs explications à cela :

- une estimation du point de départ 2017 différent (revue à la baisse dans nos scénarios, *cf.* paragraphe ci-dessus) ;
- des besoins énergétiques pour les différents secteurs marqués par des baisses importantes (sobriété énergétique dans les bâtiments, électrification des process industriels…) ;
- des objectifs PPE particulièrement ambitieux au regard du retard constaté aujourd'hui ;
- une prise en compte d'autres usages émergents de la biomasse (biocarburants…) dans certains scénarios nécessitant une répartition de la ressource ;
- des hypothèses plus faibles de mobilisation de la biomasse forestière dans plusieurs scénarios (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*).

Les limites des scénarios sont également liées à la méthode même de leur construction, qui repose sur un faisceau d'hypothèses portant à la fois sur l'offre (disponibilité de la ressource biomasse), sur la demande (besoins énergétiques) et sur les performances énergétiques des installations biomasse, ce qui peut compliquer l'équilibre entre l'offre et la demande et nuire à la cohérence globale.

Les conditions sociales de diffusion de la biomasse énergie n'ont pas été prises en compte directement dans les scénarios. Or c'est une énergie qui fait l'objet de multiples débats, autant de freins potentiels à son développement et donc à la cohérence des scénarios. Les principales controverses portent sur :

- **son bilan carbone et sa contribution à l'atténuation du changement climatique** ;
- **ses impacts sur la dégradation de la qualité de l'air ou des écosystèmes**.

Ces controverses posent de vraies questions, mais font aussi l'objet d'amalgames et de manque de nuances dans la prise en compte des différentes situations.

Afin d'améliorer le développement de projets de chaufferies biomasse, il est important de poursuivre les efforts de communication et de pédagogie. Cela permettrait d'en expliquer les bénéfices environnementaux, économiques et sociaux, mais également les impacts que l'on souhaite réduire au minimum par la mise en œuvre d'une filière à hautes performances environnementales.

7. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **MTES**, *Stratégie Française pour l'Énergie et le Climat – Programmation Pluriannuelle de l'Énergie*, 2020.

[2] **ADEME, Solagro, Biomasse Normandie, BVA**, *Étude sur le chauffage domestique au bois : marchés et approvisionnement*, 2018, 97 pages.

[3] **Avis de l'ADEME** sur le chauffage domestique au bois : https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/803-avis-de-l-ademe-sur-le-chauffage-domestique-au-bois.html.

[4] **CEREN**, « Consommations d'énergie dans l'industrie (NCE rév. 2) de 1983 à 2016 ».

[5] **Chiffres clés des EnR** : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-07/datalab_69_chiffres_cles_enr_edition2020_juillet2020_0.pdf, éditions 2020.

[6] Données statistiques Agreste : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/accueil/.

[7] **Panorama de la chaleur renouvelable 2018** : https://cibe.fr/wp-content/uploads/2018/12/Panorama_chaleur_renouvelable_2018.pdf.

8. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2017	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Production de chaleur biomasse à destination des réseaux de chaleur [TWh/an]	6,4	15	17	30	30	16,5
Production de chaleur biomasse à destination de l'industrie [TWh/an]	15,9	22	36,7	35,3	15,3	23,9
Production de chaleur biomasse pour le tertiaire (hors RC) [TWh/an]	1,8	1,8	1,6	1,6	1,6	1,8
Rendement énergétique des chaufferies biomasse [%]	85	90	90	90	90	90
Puissance électrique de cogénération biomasse [MWélec]	590	800	800	1 200	1 200	800
Efficacité énergétique de cogénération biomasse [%]	60	85	85	85	85	85
Consommation biomasse des installations cogénération [TWh]	11,8	18,2	18,2	27,3	27,3	18,2
Consommation biomasse des installations hors cogénération [TWh]	22,8	32,6	51	58,6	36,4	36,4

4. Carburants liquides

1. Le secteur des transports, principal consommateur des carburants liquides
475

2. Les biocarburants et les électro-carburants : une ressource renouvelable pour le secteur des transports
481

3. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios
487

4. Des perspectives très différentes pour les biocarburants liquides selon les scénarios
490

5. Les biocarburants, principale source des matières biosourcées
501

6. Une contribution significative des biocarburants dans le secteur des transports mais insuffisante
504

7. Des incertitudes restent à lever
510

8. Références bibliographiques
511

1. Le secteur des transports, principal consommateur des carburants liquides

Ce chapitre décrit le rôle des biocarburants liquides comme levier de décarbonation du secteur des transports pour l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone en 2050, rôle qui varie en fonction du cadrage des différents scénarios. La réglementation définit un biocarburant comme un combustible liquide (ou gazeux) utilisé pour le transport et produit à partir de la biomasse. La question des ressources est donc fondamentale pour la production de biocarburants.

La nature, la disponibilité et la mobilisation sur le territoire de la biomasse sont des enjeux clés pour le développement des filières biocarburants avec un impact important sur l'émergence de nouvelles filières biocarburants *vs* les filières déjà en place. En plus de l'identification du gisement de biomasse disponible, il a été considéré l'articulation entre ses principaux usages (alimentaire, énergie, matériaux, vecteurs énergétiques, puits naturel carbone). L'origine de la ressource pose aussi la question de la durabilité de certaines filières biocarburants notamment en termes de réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES) réellement effective à cause des impacts sur le changement d'affectation des sols (CAS). L'encadrement règlementaire actuel a pour but de limiter les impacts négatifs des filières biocarburants en classifiant les ressources par risque en termes de CAS.

Ces questions de durabilité des filières ont été prises en compte dans ce travail de prospective lors de la modélisation dans les différents scénarios pour déterminer la place et le rôle que ce vecteur énergétique peut jouer dans la transition énergétique. La filière « biocarburants » a été considérée comme l'ensemble des filières de production de carburants liquides et gazeux produits à partir de ressources biomasse. La filière « carburants de synthèse » ou électro-carburants (e-fuels) a également été considérée. L'ensemble de ces filières peut répondre aux demandes en carburants liquides et gazeux tels que l'essence, le gazole, le gazole non routier (GNR), le gaz naturel pour véhicules (GNV), le kérosène, le gazole ferroviaire, fluvial et maritime et le fioul pour le maritime.

Dans ce chapitre, seuls les biocarburants liquides et les électro-carburants seront traités. Pour les carburants gazeux se référer au chapitre *2.3.1. Mix gaz*. Dans la suite, il ne sera utilisé que les termes de biocarburants et d'électro-carburants. Le *Tableau 1* récapitule les différents biocarburants en fonction des catégories de carburants fossiles auxquels ils se substituent.

Tableau 1 Les différents types de biocarburants par catégorie de carburant

CARBURANTS FOSSILES	ÉQUIVALENTS BIOCARBURANTS
Essence	• Bioéthanol • ETBE : *Ethyl Tertio Butyl Ether* • HVHTE : huile végétale hydrotraitée essence (essence de synthèse)
Gazole	• EMAG : Ester Méthylique d'Acide Gras (biodiesel) • HVHTG : Huile végétales hydrotraitées gazole (l'acronyme anglais est très souvent utilisé : HVO-*Hydrotreated Vegetable Oil* ou HEFA-*Hydrotreated Esters and Fatty Acid* (gazole de synthèse)
Kérosène	• BioJetFuel (issu de la production des EMAG ou HVHTG)

1.1. Consommation de carburants liquides en France

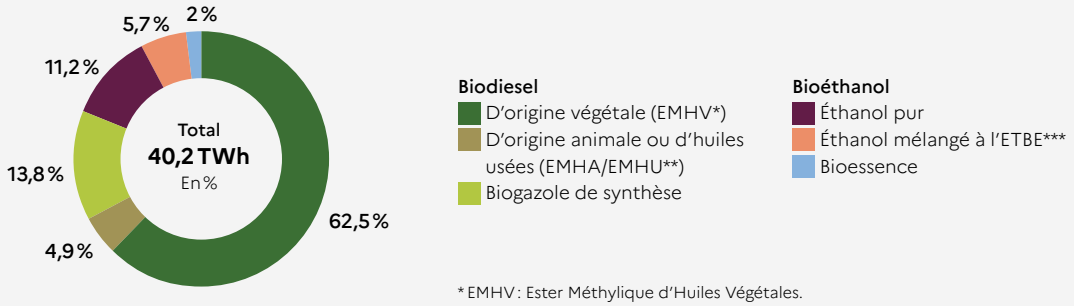
La **consommation primaire de pétrole brut et de produits pétroliers en France**, corrigée des variations climatiques, était de 1 019 TWh en 1990. Elle a ensuite progressé régulièrement jusqu'à un plateau autour des années 2000 avant d'évoluer à la baisse jusqu'en 2015. Cette année-là, la consommation primaire s'établit à 898 TWh [1]. Le pétrole représente alors 30 % du bouquet énergétique primaire réel de la France.

Cette **tendance globale à la baisse** (- 17 % entre 1990 et 2015) est principalement imputable à l'industrie, au résidentiel et au tertiaire. Le **secteur des transports est le premier secteur** consommateur de produits pétroliers avec près de 60 % de la consommation finale (528 TWh). Sa consommation est restée assez stable depuis 1990 [1]. La demande de produits non énergétiques, utilisés en grande partie par l'industrie pétrochimique, est, elle aussi, plutôt stable. Elle représente le deuxième poste de consommation des produits pétroliers (145 TWh en 2015 et 17 % de la consommation finale). La consommation dans le bâtiment et dans l'industrie décline régulièrement depuis le début des années 1980. Elle était respectivement de 106 TWh et 23 TWh en 2015. Dans l'industrie, cette baisse est le reflet de la substitution des produits pétroliers par d'autres énergies après les chocs des années 1970 et, plus récemment, du ralentissement de l'activité dans certains secteurs industriels (en particulier plâtre, chaux et ciment). Dans le bâtiment, en plus de l'augmentation des travaux d'isolation, les hausses de prix du fioul et les dispositifs d'aide[1] ont favorisé le remplacement des chaudières au fioul domestique par des équipements plus performants ou fonctionnant avec d'autres énergies.

Pour les usages transport, les produits pétroliers (gazole, essence, carburéacteurs) représentaient 90 % du mix énergétique du secteur en 2019. En ce qui concerne plus spécifiquement les carburants routiers, la stabilité de leur consommation est le résultat de la compensation de la hausse de la demande de transport par les gains d'efficacité énergétique. Le gazole reste prédominant dans les consommations par rapport à l'essence, après une hausse continue depuis les années 1990. Toutefois, sa demande diminue depuis 2016, en raison de la baisse importante des ventes de véhicules Diesel depuis 2012 (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*).

Les biocarburants liquides ont représenté 8 % du mix énergétique du transport en 2019, soit 40 TWh *(Graphique 1)*. Le biodiesel a représenté environ 81 % de la consommation de biocarburants, contre 19 % pour le bioéthanol [2]. Le SP95-E10, contenant jusqu'à 10 % d'éthanol, est distribué en France depuis 2009.

Graphique 1 Répartition de la consommation finale de biocarburants liquides par filière en France en 2019



Source : SDES, d'après Douanes [3].

* EMHV : Ester Méthylique d'Huiles Végétales.
** EMHA/EMHU : Ester Méthylique d'Huiles Animales ou Usées.
*** ETBE : éther éthyle tertio butyle.

1 Comme le CITE (Crédit d'Impôts de la Transition Énergétique), remplacé en 2021 par MaPrimeRénov', ou les certificats d'économie d'énergie, qui sont des dispositifs d'aide pour accompagner la rénovation des logements.

Il progresse régulièrement depuis. En 2019, il a représenté quasiment la moitié des ventes de supercarburants [2]. Le superéthanol E85, essence contenant jusqu'à 85 % en volume d'éthanol, a représenté 3 % des essences consommées mais est en forte croissance (+ 85 % entre 2018 et 2019) [3]. Le biogazole de synthèse a représenté 11 % des biodiesels consommés en 2017 pour un taux d'incorporation d'un peu moins de 1 % dans l'ensemble du gazole routier [4].

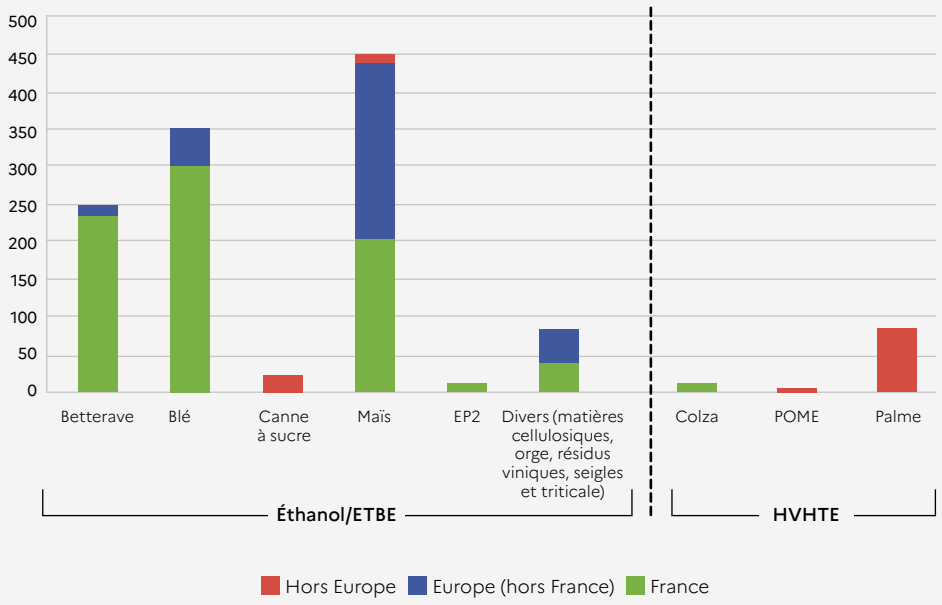
1.2. Offre en carburants liquides en France : une transition déjà entamée

Depuis plusieurs décennies, **la production nationale française de pétrole est très faible** par rapport à sa consommation et elle diminue progressivement. En 1990, 41 TWh de pétrole ont été produits en France. En 2015, cette production s'est élevée à 14 TWh, soit 1 % de la consommation nationale [1]. En Métropole, les principales zones d'exploitation sont le Bassin parisien et le Bassin aquitain. Pour répondre à la demande, la France a importé 668 TWh de pétrole brut en 2015 et 479 TWh de produits pétroliers raffinés, principalement depuis l'Arabie saoudite, le Kazakhstan, le Nigeria, la Russie et l'Angola. La France exporte également des produits pétroliers raffinés, à hauteur de 251 TWh en 2015. La facture pétrolière de la France pèse pour près des trois quarts de la facture énergétique totale, à environ 31,6 MdsEUR.

En parallèle, **la filière biocarburants se développe depuis le début des années 1990** et permet de réduire notre dépendance énergétique. Ce développement a vraiment pris de l'ampleur sur la période 2005-2010 avec un plan biocarburants au niveau national et des objectifs annuels obligatoires, en lien avec une directive européenne spécifique sur les biocarburants (2003/30) (*cf. section 1.4*). Cela a permis de faire progresser rapidement les niveaux annuels d'incorporation de biocarburants jusqu'à environ 7 à 8 % à partir de 2010. En 2019, la production primaire nationale de biocarburants est estimée à 31 TWh [5].

Les biocarburants consommés en France sont très majoritairement produits à partir de matières premières agricoles (environ 95 % en volume en 2019) et en proportion très minoritaire à partir de biomasse résiduelle (huiles alimentaires usagées ou HAU, graisses animales, sous-produits de vinification) et de biomasse lignocellulosique. Une partie des matières premières sont importées. Les *Graphique 2* et *Graphique 3* reprennent l'origine de la matière première utilisée en France en 2019 pour la production des biocarburants pour les essences et les gazoles. Les importations concernent majoritairement les huiles (soja et palme) pour la filière biogazole. Pour la filière bioéthanol, les importations de ressources sont plus limitées, il s'agit majoritairement de maïs provenant d'Europe.

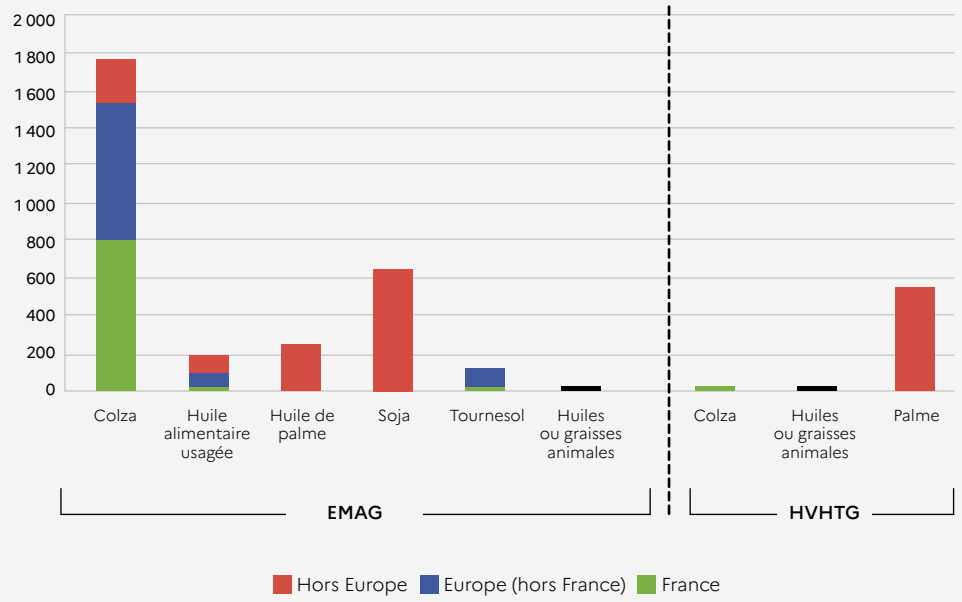
Graphique 2 Répartition de l'origine des matières premières pour la filière essence en 2019



Abréviations : EP2 : égouts pauvres de second jet, POME : *Palm Oil Mill Effluent* (effluents d'huilerie de palme et rafles), ETBE : *Ethyl Tertio Butyl Ether*, HVHTE : huiles végétales hydrotraitées essence.

Source : DGEC.

Graphique 3 *Répartition de l'origine des matières premières pour la filière gazole en 2019*



Note : EMAG : Ester Méthylique d'Acide Gras, HVHTG : huiles végétales hydrotraitées gazole.
Source : DGEC.

PRODUCTION DE CARBURANTS FOSSILES ET CONVERSION DES RAFFINERIES EN BIORAFFINERIES

La France compte en 2020 huit raffineries, dont sept sont situées en Métropole et une en Martinique. Ces raffineries sont principalement concentrées à proximité des zones portuaires de Marseille-Fos et de Basse-Seine. À la suite des deux chocs pétroliers de 1973 et 1979, plusieurs raffineries ont été arrêtées. La capacité des raffineries, de 61 Mt en 2017, s'est réduite depuis quelques années pour s'ajuster à la baisse des volumes importés : entre 2010 et 2014, avec la crise générale du raffinage européen, quatre raffineries ont été fermées. **Les émissions du raffinage de pétrole** ont été de 8,7 $MtCO_2eq$ en 2019 [6]. Elles ont été stables entre 1990 et 2009 puis, entre 2009 et 2019, une baisse des émissions de CO_2 de 45 % a été observée du fait de la baisse d'activité du secteur.

En 2019, la raffinerie de La Mède (Bouches-du-Rhône) a été reconvertie pour la production de biodiesel et de biojet (substitut kérosène). Elle est aujourd'hui la plus importante des **bioraffineries** en France, avec 500 000 tonnes de carburants annuels[2]. La seconde bioraffinerie est celle de Pomacle-Bazancourt, dans la Marne. La raffinerie de Grandpuits (Seine-et-Marne) est en cours de reconversion vers la production de biocarburants et de plastiques biosourcés pour une mise en production en 2024.

1.3. Le secteur doit opérer une profonde mutation

Le secteur du transport est très fortement dépendant des produits pétroliers, en quasi-totalité importés : le gazole, l'essence et les carburéacteurs représentaient 90 % du mix énergétique du secteur en 2019. En effet, les carburants liquides ont le principal avantage d'avoir une grande densité énergétique, d'où leur fort développement historique et l'existence de nombreuses infrastructures de transport et distribution des produits pétroliers. Ainsi le secteur des transports constitue le premier secteur d'émissions de GES en France, avec 31 % des émissions du territoire en 2019 (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*). C'est dans une logique de substitution « directe » que les biocarburants ont été massivement soutenus entre 2000 et 2010. Depuis quelques années, de nouveaux procédés de carburants synthétiques qui pourraient remplacer les carburants liquides fossiles sont également en développement. Ces carburants de synthèse, aussi appelé électro-carburants ou « e-fuels », sont obtenus à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène et pourraient être complémentaires aux biocarburants.

Dans l'objectif de neutralité carbone en 2050, l'enjeu est à la fois la diminution de la consommation de carburants liquides, en particulier d'origine fossile, et

2 Les bioraffineries produisent différents produits (biokérosène, biogazole, bionaphta, biopropane, biobutane…) et ici le classement se base uniquement sur le volume de production des biocarburants.

le développement de carburants alternatifs durables. L'enjeu lié à la demande en carburants liquides est traité dans le chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*. Le deuxième enjeu, lié à l'offre en biocarburants et électro-carburants, est l'objet de ce chapitre.

Les premiers biocarburants ont été développés à base de ressources agricoles (colza, betterave, blé…), et il a été démontré que leur capacité de réduction des émissions de GES était limitée en considérant le changement d'affectation des sols (CAS). En effet, pour augmenter la production de biocarburants, il est nécessaire de convertir des terres vers des cultures non alimentaires (en France ou ailleurs), c'est ce qui est appelé le changement d'affectation des sols direct (CASd).

Il a été aussi observé des effets indirects *via* les marchés des produits agricoles, avec des changements d'usages des terres (en France ou ailleurs), appelé le changement d'affectation des sols indirect (CASi). Les changements d'affectation des sols peuvent générer des variations de stock de carbone (par exemple en cas de passage d'une forêt ou prairie à une culture) qui sont à considérer dans l'évaluation du bilan GES des biocarburants. Le développement de la première génération de biocarburants a induit des CAS directs et indirects qui, dans certaines situations, peuvent aller jusqu'à neutraliser les bénéfices en termes d'émissions de GES.

Si l'analyse de la bibliographie montre un consensus scientifique sur l'existence du CAS indirect, il est encore très difficile de l'évaluer avec précision. Le CASi ne s'observe pas, mais ne peut être évalué qu'avec l'utilisation de modèles complexes. Sans la prise en compte du CAS, certains biocarburants présentent des réductions d'émission de GES allant jusqu'à 90 % par rapport aux référents fossiles. L'étude ACV ADEME biocarburants a montré que la filière la plus impactée par la prise en compte du CAS est le biodiesel de soja avec un bilan défavorable en prenant en compte seulement le CASd [7]. Pour limiter cet impact des biocarburants sur le CAS, une réglementation relative aux énergies renouvelables (*cf. section 1.4*) a été mise en place pour définir des exigences de durabilité et de réduction des émissions de GES pour les biocarburants.

Ainsi, les ressources utilisées pour la production des biocarburants ont été classées par rapport au risque de CAS. L'objectif est d'orienter le développement des biocarburants en utilisant de nouvelles ressources (huiles usagées, graisses animales, biomasse lignocellulosique, algues…) et de nouveaux procédés. Les biocarburants issus de biomasse lignocellulosique présentent un abattement de GES supérieur aux premiers biocarburants pouvant atteindre plus de 50 % de réduction comparés aux référents fossiles [8]. Ainsi l'encadrement règlementaire sur les biocarburants permet de les considérer comme une des solutions d'énergies renouvelables pour la décarbonation du secteur des transports. Ils permettent également de réduire la dépendance énergétique pétrolière.

1.4. Encadrement règlementaire actuel des biocarburants

Un ensemble législatif a été mis en place pour soutenir et encadrer le développement des biocarburants dans le paquet Énergie-Climat européen. **Deux directives européennes fixent des objectifs d'incorporation des énergies renouvelables et de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour le secteur des transports**. La directive 2018/2001[3] relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, dite « RED II », révise la première directive EnR (2009/28) depuis décembre 2018. Cette révision vise à limiter l'effet du CAS en identifiant les matières premières les plus à risque, en plafonnant leur incorporation puis en les éliminant progressivement d'ici 2030. Elle fixe un objectif d'énergie renouvelable de 15 % dans les transports en 2030, en confirmant le plafond de 7 % pour les biocarburants conventionnels (*cf. section 2.1* pour la définition) et une part de 3,5 % pour les biocarburants avancés (*cf. section 2.1* pour la définition). **Le plafond de 7 % pour les biocarburants conventionnels est déjà atteint en France**. Une nouvelle catégorie de carburants d'origine non biologique a été également ajoutée : les RFNBO (*Renewable Fuels No Biological Origin* ou Carburants renouvelables d'origine non biologique) qui incluent l'électricité renouvelable, l'hydrogène vert et les carburants recyclés (RCF : *Recycled Carbon Fuels*) qui correspondent aux électro-carburants. La seconde directive européenne, 2009/30/CE dite « qualité des carburants », fixe un objectif de réduction des émissions de GES produites sur l'ensemble du cycle de vie des carburants ou de l'énergie utilisée pour le transport de 10 % (dont 6 % pour les carburants) en 2020.

Avec l'annonce du paquet *Fit for 55 %* de la Commission européenne, plusieurs mesures sont en discussion pour accélérer la décarbonation des secteurs dont celui des transports parmi lesquelles :

- **la révision de la RED II** : modification de l'objectif de pourcentage d'incorporation des énergies renouvelables au profit d'un objectif de réduction des émissions de GES ;

3 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001.

- l'extension du marché carbone européen SEQE (ETS) au secteur des transports comme le maritime et la fin des quotas gratuits pour l'aérien.

Des mécanismes de soutien financier à l'incorporation des biocarburants dans les carburants fossiles ont également été mis en place en France. Dès les années 1990, l'État a détaxé partiellement les biocarburants afin de les rendre compétitifs avec les carburants fossiles. Ce dispositif a perduré jusqu'à fin 2015 avec des paliers de diminution progressive des niveaux de défiscalisation sur la période. Un second dispositif a été instauré à partir de 2006, la TGAP biocarburant, renommée Taxe Incitative Relative à l'Incorporation de Biocarburants (TIRIB) dans la loi de finances 2019, afin d'inciter les acteurs de la filière à incorporer des biocarburants. La programmation pluriannuelle de l'énergie a traduit au niveau national les objectifs d'incorporation de biocarburants avancés dans les carburants. Pour la filière essence, ils sont de 1,2 % en 2023 puis 3,8 % en 2028. Pour la filière gazole, ils sont respectivement de 0,4 % et 2,8 %.

Concernant le transport aérien, l'OACI[4] initie dès 2020 la phase test d'un programme volontaire de stabilisation des émissions de gaz à effet de serre des compagnies aériennes (le dispositif CORSIA[5] de l'OACI) qui favoriserait un déploiement important des biocarburants pour le secteur. Cependant, la convention de Chicago relative à l'aviation civile internationale est pour l'instant un frein à l'émergence de biocarburants à large échelle dans le secteur de l'aérien. En effet, cette convention exonère le kérosène de taxe au niveau international, et le multilatéralisme en vigueur au sein de l'OACI rend difficile l'évolution de cette règle. Néanmoins, à l'échelle française, le ministère des Transports a annoncé courant 2019 la mise en place d'une feuille de route énergétique qui donne un cadre à l'action de l'État. Il fixe pour objectifs un seuil d'incorporation de 2 % de biocarburants à l'horizon 2025, de 5 % en 2030, et de tendre vers 50 % en 2050 dans le transport aérien. De plus, le dispositif fiscal TIRUERT a été étendu à l'aérien dans la loi de finances initiale pour une entrée en vigueur en 2022 avec un objectif de 1 % d'incorporation de biocarburants avancés (*cf.* *section 2.1* pour la définition).

4 OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale, organisation des Nations unies qui participe à l'élaboration des normes permettant la standardisation du transport aéronautique international.
5 CORSIA : *Carbon Offsetting & Reduction Scheme for International Aviation* (Système de compensation et de réduction des émissions de CO_2 pour l'aviation internationale).

2. Les biocarburants et les électro-carburants : une ressource renouvelable pour le secteur des transports

2.1. Les filières de biocarburants liquides

La RED II a fixé un cadre règlementaire pour la dénomination des biocarburants en fonction des ressources utilisées *(Tableau 2)*. L'objectif de la RED II est la diminution des biocarburants conventionnels au profit des biocarburants avancés qui sont définis à partir des matières premières listées dans l'Annexe IX de la directive.

Tableau 2 Classification des biocarburants et électro-carburants en fonction de la ressource utilisée selon la directive RED II

Conventionnels	Avancés	Autres
• **Biocarburants** à base de cultures agricoles alimentaires (oléagineux, céréales, betteraves…)	• **Biocarburants** à base de résidus (viniques, papetiers), biomasse lignocellulosique (2G), oléagineux en CIVE (Culture Intermédiaire à Vocation Énergétique), algues, paille… • Biogaz à partir de déchets organiques, CIVE, biomasse lignocellulosique	• **Biocarburants** à base d'huiles alimentaires usagées (HAU), graisses animales (GA), amidon C, mélasse • H_2 issu d'électricité renouvelable • Carburants renouvelables d'origine non biologique (RFNBO[6])

Source : extrait de l'Annexe IX de la directive RED II.

6 RFNBO : *Renewable Fuels No Biological Origin* (acronyme anglais) dont les RCF (*Recycled Carbon Fuels*) pour les électro-carburants.

Cas particulier des CSR

Les CSR (Combustibles Solides de Récupération) sont préparés à partir de déchets solides triés non dangereux de façon à permettre une valorisation énergétique performante en chaleur et/ou en électricité pour substituer l'énergie fossile. Des projets sont en développement pour utiliser les CSR pour la production de gaz ou de carburants liquides (notamment *via* la technologie de gazéification). Mais les CSR ne sont que partiellement biogénique (60 % d'origine biogénique et 40 % d'origine fossile). Ils ne sont pas encore considérés dans la RED II mais des évolutions futures de la réglementation pourraient les rendre éligibles au statut de biocarburants. Ils ont donc été considérés dans le gisement de ressources identifié pour la production des biocarburants selon les scénarios.

Plusieurs procédés ont été développés pour transformer la biomasse terrestre et aquatique en biocarburants. Les différents procédés peuvent être classés en deux grandes familles :

- **transformation biochimique** : regroupe toutes les transformations des sucres par fermentation ou les réactions enzymatiques ;
- **transformation chimique** : regroupe toutes les réactions chimiques permettant la transformation de la matière première :
  - les réactions d'estérification-décarboxylation ou d'hydrogénation, il s'agit généralement de réaction chimique (catalyse chimique) ;
  - la voie thermochimique regroupe la gazéification, pyrolyse, torréfaction ou conversion hydrothermale.

Ainsi, **un biocarburant est défini sur la base du couple ressource/procédé**. Mais les biocarburants sont aussi définis par ordre de développement des technologies mises en place : première génération (1G) pour les biocarburants produits par fermentation alcoolique ou estérification à partir de ressources agricoles, considérée comme mature industriellement, deuxième génération (2G) pour les biocarburants produits à partir de gazéification de la biomasse lignocellulosique ou coproduits ou résidus forestiers, encore au stade démonstrateur, et troisième génération (3G) pour les biocarburants produits à partir de l'hydrogénation des huiles algales, au stade de la recherche et développement. Par la suite, il sera décrit les principales filières qui se sont développées ou en cours de développement sur la base du couple ressource/procédé.

LA FILIÈRE BIOÉTHANOL D'ORIGINE AGRICOLE (BIOCARBURANT CONVENTIONNEL[7])

La filière biocarburant « essence », pour les véhicules essence, comprend le bioéthanol et son dérivé l'ETBE (éthyl tertio butyl éther) ainsi que les bioessences de synthèse[8]. Le bioéthanol est actuellement utilisé en mélange dans les essences commerciales avec plus ou moins d'adaptations en fonction du taux d'incorporation du bioéthanol ou du type de véhicule.

Les principales ressources utilisées pour la production du bioéthanol sont les céréales (blé, maïs) et la betterave [9]. Les sucres (glucose ou saccharose) contenus dans les plantes sucrières (betterave à sucre, canne à sucre) et les plantes amylacées (céréales comme le blé ou le maïs) sont transformés en bioéthanol par un procédé de fermentation industrielle. Le bioéthanol peut être également obtenu à partir de certains résidus vinicoles (marcs de raisin et lies de vin) [10].

Cas particulier de la bioessence de synthèse

La bioessence de synthèse est un coproduit du procédé d'hydrotraitement d'huiles (dans ce cas, elle peut être dénommée huile végétale hydrotraitée essence ou HVHTE) qui fait partie des procédés 1G. Mais la bioessence de synthèse est aussi un coproduit du procédé Fischer-Tropsch[9] utilisé après la gazéification de la biomasse qui est un procédé 2G. Ce sont des processus industriels « lourds » opérés dans des unités de production du type raffineries et bioraffineries. La bioessence de synthèse est totalement miscible à l'essence et peut être incorporée à hauteur de quelques pourcents.

LE BIOÉTHANOL D'ORIGINE LIGNOCELLULOSIQUE (BIOCARBURANT AVANCÉ)

La production de bioéthanol *via* l'utilisation de biomasse lignocellulosique est une voie de plus en plus privilégiée, notamment dans le cadre de la directive RED II. Différentes sources lignocellulosiques sont potentiellement utilisables : bois, paille, coproduits et sous-produits forestiers, déchets de bois et cultures lignocellulosiques dédiées (taillis à croissance rapide). Le procédé se compose d'une première étape de traitement de la lignocellulose pour séparer les différents constituants (lignine, cellulose, hémicellulose) et obtenir les sucres. La seconde étape consiste en la fermentation des sucres pour la production du

7 Lorsque des résidus viniques sont utilisés, les biocarburants sont considérés comme « avancés » d'après la RED II.
8 La bioessence de synthèse est issue de la filière HVO en tant que coproduit du biogazole à distinguer des carburants de synthèse (électro-carburants).
9 La réaction de Fischer-Tropsch consiste en une réaction chimique catalysée qui synthétise des hydrocarbures à partir du syngaz (monoxyde de carbone et hydrogène) issu de la gazéification de la biomasse.

bioéthanol. Ce bioéthanol est obtenu *via* une voie biochimique (développée dans la première génération) utilisant des ressources classées comme menant à des biocarburants avancés. Par la suite, il sera appelé bioéthanol 2G.

LA FILIÈRE BIODIESEL/BIOJETFUEL

La production des substituts gazole et kérosène est obtenue à partir de la même ressource et de la même technologie avec des ratios différents. Les principaux produits sont le biodiesel, le bioJetFuel et le bionaphtalène (utilisé pour la filière biosourcée). En fonction du produit cible, le procédé peut être piloté pour produire plus ou moins de biodiesel, bioJetFuel ou bionaphtalène. Les différentes filières « biogazole » sont décrites ci-dessous mais elles sous-entendent la coproduction du bioJetFuel et du bionaphtalène.

LA FILIÈRE BIODIESEL D'ORIGINE AGRICOLE (BIOCARBURANT CONVENTIONNEL[10])

La filière des biocarburants gazole, souvent regroupés sous l'appellation « biodiesels », comprend différents produits regroupés sous le terme d'Ester Méthylique d'Acide Gras (EMAG) fabriqués par transestérification d'huiles issues de plantes oléagineuses, de graisses animales ou d'huiles usagées. Historiquement, les EMAG constituaient le produit « classique » : le biodiesel [11] [12] [13]. Cette filière est **la principale voie aujourd'hui de la production de biodiesel** qui se mélange à des teneurs relativement limitées dans les véhicules Diesel conventionnels à cause de la motorisation, autour de 7 % à 8 % en France [14].

Plus récemment, une nouvelle filière est apparue pour produire du biodiesel : les huiles végétales vierges hydrogénées [11] [12] [15] (HVO-*Hydrotreated Vegetable Oil* ou HEFA-*Hydrotreated Esters and Fatty Acid*) ou huiles végétales hydrotraitées gazole (HVHTG) qui correspondent à un gazole de synthèse[11]. La ressource d'origine est la même que pour le biodiesel mais le procédé de transformation est très différent : des molécules d'hydrogène sont ajoutées au produit pour former des chaînes d'hydrocarbures. Le produit final, qui ressemble fortement au gazole fossile, a un coût de revient légèrement plus élevé que le biodiesel classique mais on obtient un produit plus proche du diesel que l'on peut techniquement mélanger à près de 100 % dans un moteur Diesel actuel. Pour l'heure, un mélange à hauteur de 50 % est certifié.

LA FILIÈRE BIOGAZOLE/BIOJETFUEL D'ORIGINE LIGNOCELLULOSIQUE (BIOCARBURANT AVANCÉ)

Les biocarburants de « deuxième génération » sont obtenus par conversion thermochimique de la matière cellulosique contenue dans les résidus agricoles (paille) et forestiers (bois), dans des plantes provenant de cultures dédiées (taillis à croissance rapide) ou de la valorisation de déchets industriels. Le procédé actuellement développé est la gazéification suivie du procédé Fisher-Tropsch, aussi appelée B-t-L (*biomass-to-liquid*). Ces biocarburants sont classés comme des biocarburants avancés d'après la RED II.

Les biogazoles de synthèse obtenus par le procédé B-t-L ont des propriétés comparables à celles du gazole et sont utilisés en mélange dans le gazole commercial. Ces nouvelles filières présentent des bilans énergétiques plus favorables que les filières de première génération d'un point de vue procédé.

10 Lorsque des huiles alimentaires usagées ou des graisses animales sont utilisées dans ce procédé, alors les biocarburants sont considérés comme des biocarburants « autres » selon la RED II.
11 Attention à ne pas confondre avec les e-fuels ou carburants de synthèse, ici il s'agit du biogazole obtenu *via* la filière HVO qui est dénommée « gazole de synthèse ».

LA FILIÈRE BIODIESEL D'ORIGINE ALGALE (BIOCARBURANT AVANCÉ)

Le terme « microalgues » regroupe l'ensemble des microorganismes photosynthétiques. Certaines espèces ont la capacité de produire des composés ayant un potentiel énergétique comme les lipides (source de biodiesel). D'un point de vue énergétique, les microalgues sont intéressantes, car leur productivité surfacique est potentiellement très élevée : 50 000 litres d'huile par hectare, contre 6 000 pour l'huile de palme [13]. L'autre avantage des microalgues est qu'elles peuvent être cultivées dans des installations dédiées, hors mer et hors terres à vocation agricole, dans des bassins ou des lagunes saumâtres ou alcalines. Les biocarburants produits à partir de microalgues sont dénommés biocarburants de troisième génération et sont classés dans la catégorie « avancés » dans la RED II. Actuellement, les procédés existent, mais ils ne sont pas du tout adaptés à une production à grande échelle nécessaire pour le marché des carburants. C'est l'extraction des lipides des microalgues pour la production d'huiles qui présente le principal verrou de cette filière. Le traitement de l'huile algale est identique aux huiles végétales ou usagées (hydrogénation ou transestérification). Cette troisième génération est encore peu mature et nécessite une rupture technologique pour son développement. Des nouvelles pistes sont à l'étude comme l'utilisation de biofilm au lieu de bassin pour la production de microalgues ou des nouveaux traitements de la chaîne aval (ex. : liquéfaction hydrothermale).

Le *Tableau 3* récapitule les différents produits issus de la filière biocarburants « conventionnels » en définissant la ressource utilisée, le procédé mis en œuvre et son niveau de maturité.

Tableau 3 Récapitulatif des différents biocarburants en fonction du procédé de production et de la ressource

Type de substituts	Produits	Acronyme	Appellation	Ressources	Dénomination RED II	Procédé	Maturité/ utilisation	Propriétés
SUBSTITUTS ESSENCE	**Additif dans l'essence**	ETBE	*Ethyl Tertio Butyl Ether*	Céréales, betteraves et fossile pour l'isobutylène	Conventionnel	Fermentation puis réaction d'estérification avec l'isobutylène	Additif dans l'essence à hauteur de 15 % ou 22 %	-
	Bioessence	HVHTE	Huile végétale hydrotraitée essence, aussi appelée bioessence de synthèse	Huiles végétales vierges (plantes oléagineuses)	Conventionnel	Réaction d'hydrogénation	Identique à l'essence	Totalement miscible à l'essence
	Bioéthanol	-	Bioéthanol	Céréales, betteraves	Conventionnel	Fermentation	Majoritaire en France, maturité commerciale, addition à l'essence (SP95-E10 jusqu'à 10 % et E85 entre 65 à 85 %)	Adaptation des véhicules pour une utilisation du bioéthanol à 100 % (boîtier flex)
				Ressources lignocellulosiques	Avancé	Prétraitement de la lignocellulose avant fermentation		
SUBSTITUTS DIESEL	**EMAG : Ester Méthylique d'Acide Gras = biodiesel**	EMHV	Ester Méthylique d'Huiles Végétales	Huiles végétales vierges (plantes oléagineuses)	Conventionnel	Réaction d'estérification avec du méthanol	Majoritaire en France, maturité commerciale (essentiellement importés)	Faible miscibilité avec le diesel (incorporation 7-8 %)
		EMHU	Ester Méthylique d'Huiles Végétales Usagées	Huiles végétales usagées	Autre			
		EMHA	Ester Méthylique d'Huiles Animales	Graisses animales	Autre			
	HVO : huiles végétales ou graisses animales hydrogénées = biogazole	HVHTG	Huiles végétales hydrotraitées gazole	Plantes oléagineuses	Conventionnel	Réaction d'hydrogénation	Minoritaire en France, première unité à La Mède	Identique au diesel, émissions NO_x plus faible que les EMAG
				Huiles usagées, graisses animales	Autre		Mature	
				Huiles algales	Avancé		Pilote	-
	Biogazole de synthèse	-	-	Ressources lignocellulosiques (bois, pailles, résidus, coproduits...)	Avancé	B-t-L : gazéification suivie de Fisher-Tropsch	Démonstrateur (pas d'unités commerciales)	Totalement miscible avec le gazole

Source : extrait de l'Annexe IX.

LES BIOCARBURANTS AÉRONAUTIQUES

Les biocarburants sont considérés comme des carburants alternatifs durables de type drop-in[12] pour le secteur de l'aérien. Les technologies de production de bioJetFuel en substitution au kérosène ont des maturités différentes, il s'agit des mêmes procédés et même ressources que pour les substituts diesel. La certification ASTM[13] garantit la sûreté et la compatibilité d'usage des biocarburants. À ce jour, six technologies de production de biocarburants aéronautiques sont certifiées ASTM pour un usage en mélange avec le kérosène fossile [14] [15].

2.2. Les électro-carburants ou e-fuels

Les carburants de synthèse sont obtenus à partir de CO_2 et d'H_2. Il s'agit d'une des voies de valorisation du CO_2, plus communément appelée CCU (*carbon capture and utilisation*). Parmi les différents procédés en développement, la voie *power-to-liquid* (P-t-L) permet de produire des carburants de synthèse, appelés « électro-carburant » ou « e-fuels » en utilisant l'hydrogène produit *via* l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable. De nombreux projets sont en cours, au stade pilote ou démonstrateur, mais il n'existe pas encore d'unité à l'échelle industrielle. Parmi les produits cibles, le méthanol est celui qui est le plus étudié [16]. Le méthanol peut ensuite servir d'intermédiaire pour la production de carburants liquides (diesel, diméthylether…) ou être utilisé directement comme carburant.

Une autre voie, n'utilisant pas le méthanol, est aussi en développement pour produire des carburants synthétiques type gazole ou kérosène. Il s'agit de la combinaison de deux briques technologiques :

- production de syngaz (mélange CO/H_2) à partir de CO_2 en présence de H_2 ;
- suivie de la synthèse des carburants à partir du procédé de Fischer-Tropsch (même brique que celle du B-t-L).

La brique pour la production de syngaz a été démontrée à l'échelle pilote. En Allemagne, la compagnie Sunfire a mis au point un démonstrateur produisant du e-crude[14] (diesel synthétique) à partir de CO_2 atmosphérique et d'hydrogène électrolytique [17].

2.3. De nombreux freins encore à lever

Les filières de production de biocarburants avancés à partir de ressources lignocellulosiques, bien que non matures aujourd'hui, pourraient représenter au-delà de 2030 un levier important de production de carburants renouvelables, à la condition que les investissements R&D se poursuivent afin de lever les derniers verrous techniques et économiques. En effet, **les freins économiques au développement de ces filières sont actuellement importants, aussi bien sur les investissements que dans l'exploitation**. Compte tenu des niveaux d'investissements nécessaires, seuls des acteurs économiques suffisamment solides financièrement pourront se lancer dans la mise en place des nouveaux outils de production. On peut attendre une baisse des coûts avec les courbes d'apprentissage. Les biocarburants ont un coût de production très élevé par rapport aux carburants fossiles. Le *Tableau 4* récapitule les prix moyens pour le biodiesel et le bioéthanol à l'importation et à l'exportation. La rentabilité des biocarburants s'avère donc difficile, même avec une incitation fiscale[15].

Tableau 4 Prix moyens des biocarburants à l'importation et à l'exportation

En euros par tep	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Importations	**1 235**	**1 109**	**945**	**822**	**844**	**860**	**934**	**866**
Bioéthanol	1 401	1 238	1 216	1 015	872	943	1 004	981
Biodiesel	1 194	1 096	925	798	842	855	929	859
Exportations	**1 340**	**1 188**	**1 124**	**1 021**	**872**	**997**	**943**	**946**
Bioéthanol	1 358	1 200	1 151	1 076	793	905	966	1 001
Biodiesel	1 165	1 110	1 012	891	963	1 037	936	940

Source : calculs SDES, d'après DGDDI.

12 Carburants de structure chimique analogue aux carburants fossiles facilitant leur incorporation à haute teneur.
13 *American Society for Testing and Materials.*
14 Le kérosène et le diesel sont obtenus *via* le traitement du crude.
15 L'article 32 de la loi de finances pour 2005 a introduit une taxe sur la consommation d'essence d'une part et de gazole d'autre part basée sur le prix de vente hors TVA (renommée Taxe Incitative Relative à l'Incorporation de Biocarburants dans la loi de finances 2019). Elle encourage l'incorporation et la distribution de biocarburants en pénalisant les opérateurs qui mettent à la consommation une proportion de biocarburants inférieure à l'objectif d'incorporation dans chacune des filières.

L'incorporation des biocarburants aux produits pétroliers augmente le coût des carburants. En 2019, à quantité d'énergie équivalente, le surcoût dû à l'incorporation de biodiesel s'établit à 1,8 centime d'euros par litre (cEUR/litre) de carburant gazole et celui dû à l'incorporation de bioéthanol s'établit à 2,1 cEUR/litre de carburant essence.

L'équivalent en termes de coût de la tonne de CO_2 évitée pour l'incorporation des biocarburants a été estimé en prenant en considération le gain en termes d'émissions qui est compris entre 50 % (seuil de durabilité fixé par la législation européenne) et 100 % de celles des produits pétroliers correspondants. En 2019, ce coût[16] s'élevait entre 75 EUR/tCO_2 et 149 EUR/tCO_2 pour le biodiesel et entre 114 EUR/tCO_2 et 227 EUR/tCO_2 pour le bioéthanol.

Pour les carburants de synthèse, leur coût de production est également très élevé par rapport aux carburants fossiles. Par exemple, pour le méthanol à base de CO_2, le prix est 4 fois celui du méthanol fossile [13]. La question de la compétitivité des « électro-carburants » est donc liée aux évolutions relatives des coûts (soutien public et fiscalité compris) de l'ensemble des énergies fossiles et alternatives comme les biocarburants (qui sont majoritairement en développement).

Par ailleurs, **la production de biocarburants, qu'ils soient conventionnels ou avancés, est limitée par le potentiel de biomasse mobilisable**. Elle est potentiellement en concurrence avec d'autres usages des sols, d'autres valorisations de la biomasse (alimentation, produits biosourcés, chaleur, gaz renouvelable). Elle se doit d'intégrer les **multiples enjeux environnementaux de préservation de la biodiversité, de réduction des pesticides, le changement d'affectation des sols (CAS)** (*cf.* *section 1.3*) **et la préservation des puits de carbone** (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). L'estimation du potentiel de biomasse mobilisable nécessite une analyse globale de l'usage des sols. Il dépend notamment des hypothèses d'évolution des besoins pour l'alimentation, libérant plus ou moins d'espace pour des usages énergétiques. Par ailleurs, le potentiel de développement de la ressource biomasse en 2050 est également impacté par le changement climatique et par la disponibilité future des ressources en eau, qui affecteront de plus en plus les rendements. L'impact du changement climatique à ces horizons génère une incertitude sur le potentiel de biomasse mobilisable dans les prochaines décennies. Les autres ressources – résidus des industries agroalimentaires, déchets gras et algues – ne pourront représenter qu'un complément assez marginal aux biocarburants issus de biomasse agricole et forestière.

Quant aux carburants de synthèse, pour avoir un bénéfice en termes de réduction de gaz à effet de serre, ils requièrent une quantité importante d'électricité renouvelable et/ou décarbonée sous forme d'hydrogène et de CO_2 biogénique. Cette demande importante en électricité et en hydrogène entre en concurrence avec les autres usages de ces deux vecteurs (*cf.* chapitre *2.3.5. Hydrogène*).

Le potentiel de développement des carburants liquides renouvelables étant physiquement limité par les volumes de biomasse et d'électricité requis, l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 nécessite de **réduire les consommations globales de carburants liquides de manière drastique**, par des efforts de modération de la demande de transport, de report modal, d'efficacité énergétique et de substitution des carburants liquides vers d'autres vecteurs : gaz, hydrogène, électricité (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*).

L'atteinte de la neutralité carbone en 2050 nécessite de réduire les consommations globales de carburants liquides de manière drastique.

Au-delà des aspects techniques et économiques, la perception des biocarburants par le grand public pourra représenter un frein au développement de la filière qui souffre d'une mauvaise image historique des biocarburants conventionnels, notamment en raison des impacts sur le changement d'affectation de sols. L'installation de sites de production de biocarburants utilisant des ressources d'origine forestière nécessitera une validation des plans d'approvisionnement compte tenu des grandes quantités de biomasse requises.

A contrario, **la filière présente des externalités positives** qui pourraient favoriser leur insertion dans les territoires : valorisation de déchets, relocalisation des activités, création d'emplois directs et indirects en particulier dans des territoires ruraux, complément de revenus pour les agriculteurs…

16 Les coûts estimés ici ne prennent pas en compte les émissions indirectes liées au changement d'affectation des sols et seraient supérieurs si c'était le cas.

3. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios

Dans le cadre de cet exercice de prospective, l'offre de biocarburants s'est construite pour répondre à la demande des transports. En effet, pour chaque scénario, les demandes d'énergies finales ont été déterminées puis déclinées en fonction des différents vecteurs énergétiques (essence, gazole, GNV, électricité, H_2...) utilisés au sein de chacun des modes de transport (routier, ferroviaire, aérien, fluvial, maritime et engins non routiers). Cette demande de biocarburants a ensuite été comparée et ajustée en fonction de la disponibilité des biocarburants qui a été calculée en fonction des ressources biomasses mobilisées et des technologies considérées.

Toutes les hypothèses et données relatives au secteur des transports se trouvent dans le chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*. Pour la part biocarburant gazeux, se référer au chapitre *2.3.1. Mix gaz*. Ici, ne sera détaillée que la méthodologie pour estimer la production de biocarburants liquides et électro-carburants pour chaque scénario. Toutes les ressources et technologies de production de biocarburants liquides et électro-carburants ont été envisagées. Les principales hypothèses sont :

- **périmètre de l'offre biocarburants** : le secteur des transports, les soutes internationales incluses ;
- **tous les substituts des carburants ont été considérés** : diesel[17], essence, kérosène ;
- **bouclage imports/exports** : il a été considéré le même niveau d'importation en huiles dans tous les scénarios qui correspond au niveau actuel des importations ; il n'y a pas d'exportations considérées dans les scénarios ;
- **production de biocarburants et d'électro-carburants** déterminée par itérations entre le secteur des transports et le secteur agricole et forestier pour prendre en compte la disponibilité de la ressource biomasse (hiérarchie des usages de la biomasse décrite plus bas);
- **différentes technologies sont considérées par scénario en fonction de leur maturité** :
  - pour S1 et S2 : ce sont principalement les technologies matures qui ont été prises en compte (fermentation alcoolique, estérification et hydrogénation) car il s'agit de scénarios avec peu de développement technologique ;
  - pour S3 et S4 : toutes les technologies ont été prises en compte y compris l'utilisation des microalgues et les e-fuels malgré leurs faibles maturités actuelles car ce sont des scénarios avec des forts développements technologiques. Les technologies B-t-L (gazéification) ont aussi été considérées comme matures en 2050 ;
  - la consommation en hydrogène et méthanol a été prise en compte pour la production respectivement des HVO et des EMAG (biocarburants conventionnels). Il a été supposé que le méthanol provenait de la filière électro-carburants (*power-to-liquid*) et donc sa consommation en hydrogène a aussi été estimée.

En raison d'une forte demande en carburants liquides pour le secteur des transports, toutes les biomasses disponibles pour une valorisation énergétique ont été incluses dans l'estimation des gisements pour les biocarburants liquides. Au final, ce n'est pas l'aspect économique (coûts des gisements de biomasse ou coûts des différents biocarburants liquides et carburants de synthèse) qui a piloté le choix des technologies déployées, mais la disponibilité en ressources biomasse pour pouvoir répondre à la demande. L'offre a même été ouverte aux CSR (qui n'ont qu'une part de 60 % biogénique) et au CO_2 à travers les carburants de synthèse (utilisation de CO_2 biogénique). Les électro-carburants ne sont pas considérés dans l'offre biocarburants et apparaissent par la suite séparés des biocarburants.

17 Cela englobe en termes d'usage les applications gazole routier, non routier et le fioul.

Pour plus de simplification par la suite, les biocarburants seront classés en deux catégories : conventionnels ou avancés (la part relative des biocarburants autres est négligeable et a été associée aux biocarburants avancés). Les procédés sont rappelés avec la dénomination 1G pour la filière fermentation des sucres, estérification et hydrogénation, 2G pour la gazéification et voie biochimique pour le bioéthanol et 3G pour la production à partir d'algues.

RÉPARTITION DES BIOCARBURANTS PAR TYPOLOGIE DE CARBURANTS

Les hypothèses sur la mobilité (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*) répartissent l'énergie consommée dans le transport routier en 2050 par vecteur énergétique (électricité, H_2, GNV, biocarburants liquides…). Pour le besoin en carburants liquides, la réponse à la demande a été répartie comme suit :

- **les substituts à l'essence** seraient assurés par un carburant composé de 85 % vol. d'éthanol et 15 % vol. d'essence synthétique (issue des procédés HVO et/ou B-t-L) ou 100 % éthanol ;
- **les substituts au gazole** routier seraient assurés par le biodiesel EMAG, puis les gazoles synthétiques de type HVO et le biodiesel issu du B-t-L ;
- **les substituts GNR** (gazole non routier) seraient composés d'EMAG de type B100, d'ED95 et de bioGNV ;
- **les substituts au fioul et gazole fluvial et maritime** sont quant à eux substitués également en différentes proportions dans les scénarios par des EMAG (transport fluvial et maritime) et par du bioGNL (transport maritime). D'un point de vue technique d'autres substitutions pourraient être envisagées pour ces secteurs mais par souci de simplification, compte tenu des volumes engagés, ce sont uniquement ces deux types de biocarburants qui ont ici été considérés ;
- **les substituts au kérosène pour le transport aérien** sont composés en différentes proportions de biocarburants certifiés ASTM de type SPK (*Synthetic Parafinic Kerosen*) parmi lesquels on retrouve les HEFA (voies HVO et EMAG), les FT (voie B-t-L) et les e-kérosènes (voie P-t-L). Il y a deux autres voies, qui n'ont pas été considérées ici, les *alcohol-to-jet* (ATJ) et les *isobutene-to-jet* (ITJ) car la production en bioéthanol n'était pas assez importante pour l'utiliser comme ressource pour la production de bio-JetFuel et car l'excédent de bioéthanol a été orienté vers le secteur de la chimie.

ESTIMATION DU GISEMENT DE BIOMASSE DISPONIBLE POUR L'OFFRE BIOCARBURANTS

Le chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* décrit la ressource en biomasse, en vue d'une valorisation non alimentaire. Plusieurs hypothèses sont prises en fonction du cadrage des scénarios. Ainsi, les volumes et quantités de biomasses issus des systèmes agricoles et forestiers varient fortement selon leurs niveaux d'implantation (surfaces, rendements) et leurs taux de mobilisation. Pour prendre en compte l'impact du changement climatique à l'horizon 2050, il a été considéré des rendements agricoles prudents et la modélisation pour la forêt a été faite avec un climat aggravé.

Pour déterminer la part de biomasse pour une valorisation en biocarburants, il a été considéré **les différents usages et le niveau de demande pour des usages énergétiques et matériaux**. Il a été également inclus les biomasses non directement issues des systèmes de production (agricole ou sylvicole), résultant de chaînes de transformation ou d'éventuels premiers usages d'une ressource (exemple : déchets bois, produits connexes de scierie, liqueur noire…).

Les scénarios biocarburants s'insèrent donc dans une vision globale de la valorisation de la ressource en biomasse, vision équilibrée entre offre et demande tenant compte de facteurs physiques de conversion, transformation, réutilisation ou recyclage des biomasses considérées. Hors de la fonction alimentaire, la mobilisation de la biomasse a été hiérarchisée en fonction des usages :

1. la valorisation matériau ;

2. la valorisation énergétique : selon les scénarios, priorité est donnée à tel ou tel usage énergétique. Cependant, pour la biomasse agricole, l'usage en méthanisation reste la voie privilégiée avec des niveaux d'implantation et de mobilisation de certaines ressources (effluents d'élevage, cultures intermédiaires, résidus de culture) très supérieurs à ceux d'aujourd'hui ; les usages en combustion, biocarburant, voire pyrogazéification évoluent fortement d'un scénario à l'autre selon les hypothèses de demande ou de disponibilité de la biomasse résiduelle non valorisée par ailleurs.

Ainsi, la part de ressource en biomasse disponible pour les biocarburants liquides a été estimée d'après cette hiérarchisation. L'offre biocarburants, qui a été calculée, représente le gisement disponible pour cet usage. **L'objectif n'était donc pas d'orienter l'offre biomasse pour répondre à la demande de biocarburants liquides identifiée par le secteur des transports**

mais bien de maximiser l'usage matériau à longue durée de vie. En effet, ces matériaux stockent une partie du carbone prélevé en forêt pendant leur durée de vie et peuvent se substituer à d'autres plus émetteurs de GES (béton, matériau, etc.).

Les deux grandes catégories de biomasse considérés pour la production des biocarburants liquides sont celles présentant les plus forts enjeux de concurrence d'usages[18] :

- **la biomasse à destination des biocarburants conventionnels**, c'est-à-dire issue des cultures oléagineuses (colza, tournesol, soja), des cultures céréalières (blé, maïs et betteraves) ;

- **la biomasse à destination des carburants avancés issus des technologies B-t-L**, c'est-à-dire les cultures lignocellulosiques, bois forêt et hors forêt, les résidus de cultures (pailles), déchets bois/liqueur noire. Pour cette ressource biomasse, il a été considéré les hypothèses suivantes :

  – pour S1 et S2, priorité à la valorisation matière des déchets bois puis à la valorisation énergétique sous forme de combustion ;

  – pour S3 et S4, priorité à la valorisation énergétique des sous-produits et déchets bois.

La biomasse algale a été considérée uniquement dans S3 et S4 avec un développement limité de cette filière à l'horizon 2050 *via* la levée des principaux verrous : découverte de souches avec un fort potentiel énergétique ou procédés d'extraction des molécules plus performants d'un point de vue énergétique. Cette hypothèse se justifie par le cadrage de ces deux scénarios qui mettent en place d'importants moyens de R&D pour faire émerger les technologies de troisième génération au stade industriel.

La production de biocarburants a été estimée à partir des quantités de biomasse disponibles et des rendements moyens pour chaque procédé de transformation de la biomasse [18].

LES CARBURANTS DE SYNTHÈSE

Pour compléter l'offre des biocarburants liquides, il a été nécessaire d'avoir recours aux électro-carburants (e-kérosène et e-gazole) *via* la technologie *power-to-liquid* (P-t-L). Les volumes ont été fixés pour répondre au besoin de carburants liquides et plus précisément à la demande en kérosène pour le secteur de l'aérien mais aussi à la demande de gazole (ex. : fluviale). La principale contrainte de cette technologie est la forte consommation en électricité (environ 50 % de rendement énergétique) ce qui limite son développement. Dans les hypothèses de modélisation, il a été pris en compte :

- **la production d'hydrogène** ;

- **la disponibilité des sources de CO_2.** Le CO_2 biogénique est privilégié en visant les unités de méthanisation car le CO_2 est quasiment pur et les unités sont bien réparties sur tout le territoire ou les bioraffineries ;

- **consommation électrique totale du système** : un rendement de 50 % a été pris ;

- **le P-t-L a été considéré dans S2, S3 et S4**. Il n'a pas été envisagé la mise en place de P-t-L dans S1 car l'offre technologique n'est pas développée. Pour S2, il est supposé un développement local sur des zones industrielles dans une dynamique territoriale.

Quand l'offre de biocarburants et d'électro-carburants ne permet pas de répondre à toute la demande du secteur des transports, alors les produits pétroliers sont utilisés en complément.

18 Pour les autres ressources envisagées, les volumes sont en général restreints et pour certaines ressources résiduelles déjà orientées vers la production de biocarburants en majorité.

4. Des perspectives très différentes pour les biocarburants liquides selon les scénarios

Les différents substituts aux carburants fossiles, le mode d'obtention et la nature de la biomasse utilisée pour les produire sont spécifiques à chacun des cinq scénarios. Le *Tableau 5* résume le niveau de développement des différentes technologies mises en œuvre par scénario pour la production des biocarburants en fonction de la biomasse.

Tableau 5 Pénétration des technologies de productions de carburants biosourcés et de synthèse par scénario

	TEND	S1	S2	S3	S4
Biocarburants conventionnels (EMAG, HVO, bioéthanol)	+++	+++++	++++	+++	+++
Biocarburants avancés – 2G – lignocellulosiques	+++	-	+	++++	++++
Biocarburants avancés – 2G – CSR	-	+	++	-	++
Biocarburants avancés – 3G – microalgues	-	-	-	++	++
Électro-carburants	+	-	++	+	++

4.1. Scénario tendanciel : une contribution limitée

Dans le chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*, le scénario tendanciel projette l'évolution probable des différents leviers de décarbonation des transports au vu des tendances actuelles. Certains objectifs de politiques publiques ont été intégrés, s'ils sont assortis de moyens suffisants pour les atteindre. **La neutralité carbone de ce secteur n'est pas atteinte**, en raison d'un volontarisme insuffisant sur les leviers de la transition. Sur la décarbonation de l'offre énergétique, elle n'est pas atteinte et le pétrole reste dominant, hormis quelques segments électrifiés.

Ainsi le développement des biocarburants s'appuie sur des dispositions déjà mises en œuvre : RED II, LTECV (plafond de 7 % PCI pour les biocarburants conventionnels, cible de 3,5 % PCI pour les biocarburants avancés et bioGNV), ainsi que l'Engagement pour la Croissance Verte (ECV)[19] sur les biocarburants aéronautiques (cible de 5 % PCI pour le bioJetFuel). Ces proportions sont prévues à l'horizon 2030 et sont considérées comme maintenues à l'horizon 2050. Par ailleurs, l'atteinte de ces objectifs se fait comme pour la TIRIB, en appliquant la cible d'incorporation par classe de carburant. Pour les biocarbu-

19 L'État français a signé fin 2017 un partenariat public/privé sous la forme d'un Engagement pour la Croissance Verte (ECV) relatif à la mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durables en France, issus de biomasses de type déchets.

rants avancés, on utilise les objectifs PPE 2028 par catégorie de biocarburant liquide.

Du point de vue des filières de production de biocarburants, ce scénario est une prolongation linéaire des voies déjà développées ou en cours de développement. Globalement, les biocarburants conventionnels répondent à 17 % de l'offre en biocarburants liquides *(Graphique 4)*.

Pour les substituts essence (12 % des biocarburants liquides produits), la production de bioéthanol provient essentiellement des technologies de première génération qui restent majoritaires. Le B-t-L se développe aussi dans ce scénario à hauteur de 40 % de la part de bioéthanol produit. Pour le substitut gazole (65 % des biocarburants liquides produits), la majorité du biodiesel provient de la production d'EMAG à partir d'huiles vierges ou recyclées ainsi que d'une part plus minoritaire d'HVO. Une part plus faible de biodiesel provient de la gazéification de la biomasse. De même, la production de bioJetFuel (23 % des biocarburants liquides produits) est réalisée essentiellement à partir des procédés 1G et *via* le P-t-L qui se développe de manière limitée dans ce scénario. Finalement, malgré un développement relativement important des technologies de production de biocarburants liquides (15 % pour le terrestre par rapport à la demande totale de carburants liquides), la décarbonation des carburants est limitée en raison de la demande du secteur des transports qui est élevée dans ce scénario *(Tableau 6)*.

Graphique 4 Évolution temporelle de la production des biocarburants dans le scénario tendanciel

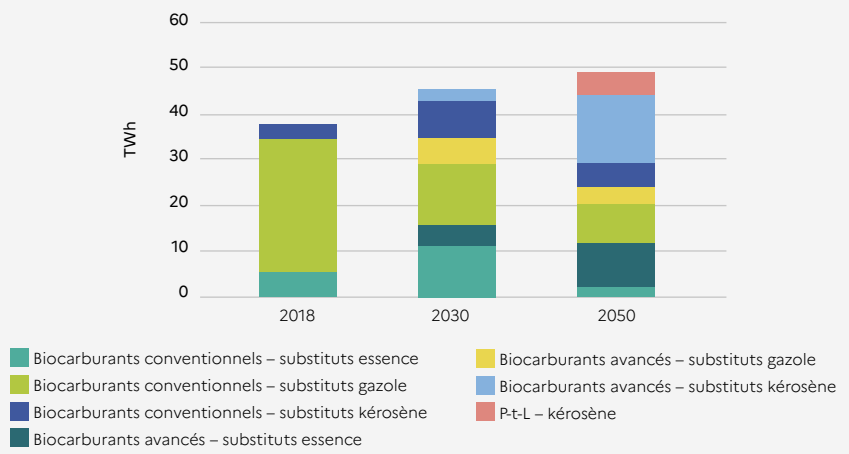


Tableau 6 Offre totale de biocarburants par typologie de substituts dans le scénario tendanciel

Biocarburants	Production (TWh)				Part biocarburants liquides par rapport à la demande totale en carburants liquides (%)
	Hors soutes*	Soutes DOM	Soutes	TOTAL	
Substitut diesel	15,4	-	-	15,4	**10**
Substitut essence	12,2	-	-	12,2	**37**
Substitut kérosène	13,8	11,4		25,2	**22**
Substitut fioul	-	-	0,9	0,9	**5**
Substitut gazole pour maritime, fluviale et ferroviaire	0,6	-	-	0,6	**11**
TOTAL substituts	46,3	11,4	0,9	58,6	**17**

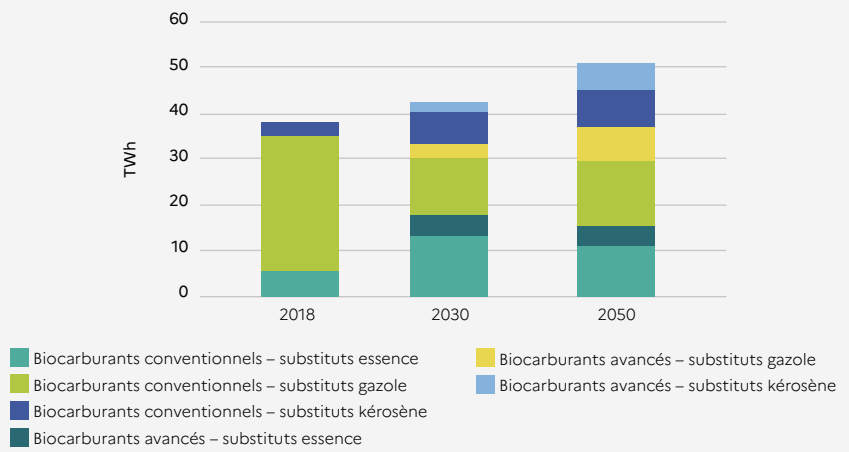
* Inclus tous les modes de transport (terrestre, ferroviaire, maritime et fluvial).

4.2. Scénario 1: forte réduction de la demande de carburant liquide

Les évolutions de ce scénario sont guidées par la recherche de sobriété dans les mobilités, en particulier *via* une modération marquée de la demande de transport et un report modal important vers les modes sobres en énergie et en ressources. Le mix énergétique du transport s'électrifie largement, en particulier pour les voitures. Une part de carburants liquides subsiste néanmoins pour des modes difficiles à décarboner, en particulier le transport lourd sur de longues distances où il est supposé un développement du gaz et du gazole mais pas de l'électrification. **Cette demande en carburants liquides s'élève à 96 TWh en 2050, soit une baisse de 82 % par rapport à aujourd'hui.**

Au total, 49 TWh de biocarburants liquides sont produits en France. Au niveau des technologies mises en œuvre, il est considéré un développement minoritaire des biocarburants avancés. En effet, la priorité a été donnée à la préservation du puits de carbone naturel et à l'utilisation de la biomasse dans les matériaux à longue durée de vie ce qui limite la disponibilité de la ressource forestière et lignocellulosique pour la production de biocarburants. De plus, l'investissement dans l'innovation est faible. Les nouvelles filières comme la gazéification de biomasse ne se développent pas à l'échelle industrielle. Les filières de première génération répondent donc à 87 % de l'offre en biocarburants liquides. La principale ressource pour la production des biocarburants provient de la biomasse agricole[20], à près de 80 % de la ressource biomasse totale, avec l'hypothèse d'un maintien des installations actuelles. La filière des biocarburants avancés, *via* la technologie B-t-L, se développe de manière marginale en utilisant la ressource paille et les CSR qui sont les seules ressources disponibles pour répondre à la demande en gazole et kérosène. Le *Graphique 5* synthétise l'évolution de la production des biocarburants par catégorie et substituts de 2018 à 2050.

Graphique 5 Évolution temporelle de la production des biocarburants dans S1



20 Pour une vision globale de la production de la biomasse non alimentaire pour valorisation énergétique ou matière se référer au chapitre *2.4.2 Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*.

Les substituts essence représentent 28 % des biocarburants liquides produits avec la majorité provenant du bioéthanol 1G. Les substituts diesel proviennent en majorité de la production d'EMAG à partir d'huiles vierges ou recyclées ainsi qu'une part plus minoritaire d'HVO. De même, la production de bioJetFuel (30 % des biocarburants liquides produits) est réalisée essentiellement à partir des procédés 1G. La technologie P-t-L pour la production de carburants de synthèse n'est pas disponible dans ce scénario car il y a très peu de développement technologique. De plus, **il n'y a pas assez de biocarburants pour substituer le carburant nécessaire pour le Gazole Non Routier (GNR *i.e.* carburant pour les engins agricoles et BTP) qui est presque entièrement d'origine fossile (0,6 TWh de 1G-bioéthanol a pu être attribué sur les 3 TWh identifiés).**

Globalement, l'offre de biocarburants répond à 50 % du besoin en carburants du secteur des transports *(Tableau 7)*. Le complément est réalisé par les produits pétroliers. Comme il s'agit d'une part importante, il est considéré qu'une raffinerie sera encore en fonctionnement pour y répondre. Ainsi, S1 est le seul scénario dans lequel une raffinerie est maintenue. Dans les autres, toutes les raffineries sont fermées ou converties en bioraffineries.

Tableau 7 Offre totale de biocarburants par typologie de substituts dans S1

Biocarburants	Production (TWh)				Part biocarburants liquides par rapport à la demande totale en carburants liquides (%)
	Hors soutes*	Soutes DOM	Soutes	TOTAL	
Substitut diesel	17,5	-	-	17,5	**48**
Substitut essence	13,6	-	-	13,6	**100**
Substitut kérosène	6,3	6	0,9	13,2	**40**
Substitut fioul	-	-	1,6	1,6	**24**
Substitut gazole pour maritime, fluviale et ferroviaire	2,8	-	-	2,8	**47**
TOTAL substituts	61,4	6	2,7	49	**51**

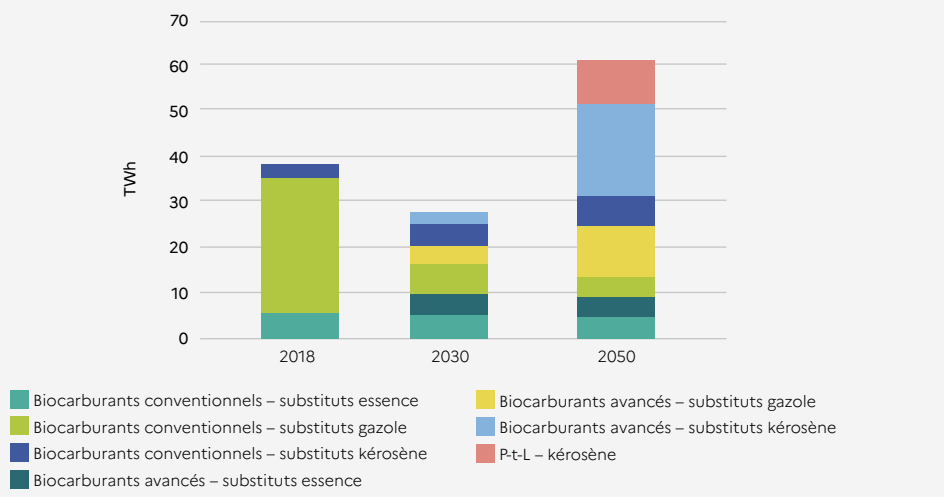
* Inclus tous les modes de transport (terrestre, ferroviaire, maritime et fluvial).

4.3. Scénario 2 : les biocarburants avancés majoritaires

Ce scénario est guidé par une recherche de soutenabilité en co-construction avec les acteurs de la mobilité et les citoyens, au plus proche de leurs besoins et des spécificités des territoires. Le levier de report modal (vers la marche, le vélo) est sollicité de manière très forte. Le mix énergétique est très diversifié car ce scénario est celui qui fait le plus appel au vecteur hydrogène et à l'électrification des usages. La demande en carburants liquides s'élève à 78,6 TWh en 2050, soit une baisse de 85 % par rapport à aujourd'hui.

Au total, 61,4 TWh de biocarburants liquides et d'électro-carburants sont produits. Pour les biocarburants conventionnels et les technologies mises en œuvre, les mêmes hypothèses que dans S1 sont retenues sur la production agricole avec les mêmes rendements, la même surface agricole et les mêmes unités de production. Les biocarburants avancés sont produits avec une diversification des matières premières et le développement du B-t-L pour répondre à la demande. Comme dans S1, la ressource forestière et lignocellulosique est limitée par la priorité donnée à la préservation du puits de carbone naturel, à l'utilisation du bois dans les matériaux à longue durée de vie et à la production de chaleur. Les biocarburants avancés sont toutefois plus présents dans le mix que dans S1, grâce à un accès à de la ressource lignocellulosique (2,5 Mt MS) en plus de la paille (au même niveau que S1). Un gisement plus important de CSR (3 Mt) est aussi dédié à la production de biocarburants liquides avancés en plus de la production des électro-carburants, à hauteur de 9,1 TWh, soit 17 % des biocarburants liquides produits. Le *Graphique 6* synthétise l'évolution de la production des biocarburants par catégorie et substituts de 2018 à 2050.

Graphique 6 Évolution temporelle de la production des biocarburants dans S2



Les substituts essence représentent 13 % des biocarburants liquides produits, les substituts gazole 26 % et les substituts kérosène 46 %. Par ailleurs, 15 % de la production globale est destinée à la part GNR soit 9,6 TWh. Les substituts essence proviennent essentiellement du bioéthanol 1G (environ 60 %). Les substituts diesel proviennent pour moitié de la production d'EMAG et d'HVO à partir d'huiles vierges ou recyclées et pour l'autre moitié de la production de biodiesel *via* la voie B-t-L à partir de biomasses lignocellulosiques ou de CSR. Pour les substituts kérosène, le bioJetFuel provient majoritairement des biocarburants avancés.

En excluant la consommation des engins agricoles et BTP (carburant GNR), la production est de 51,8 TWh. L'offre de biocarburants répond à 66 % du besoin du secteur des transports. Le complément est réalisé en partie par les électro-carburants (équivalant à 9 TWh) pour compléter le bioJetFuel. Le reste est réalisé par les produits pétroliers *(Tableau 8)*.

Tableau 8 Offre totale de biocarburants par typologie de substituts dans S2

Biocarburants	Production (TWh)				Part biocarburants liquides par rapport à la demande totale en carburants liquides (%)
	Hors soutes*	Soutes DOM	Soutes	TOTAL	
Substitut diesel	13,6	-	-	13,6	**90**
Substitut essence	7,7	-	-	7,7	**99**
Substitut kérosène	7,4	6,6	10,2	24,2	**54**
Substitut fioul	-	-	3,8	3,8	**45**
Substitut gazole pour maritime, fluviale et ferroviaire	2,5	-	-	2,5	**89**
TOTAL substituts	43,8	6,6	14	51,8	**66**

* Inclus tous les modes de transport (terrestre, ferroviaire, maritime et fluvial).

4.4. Scénario 3 : recours à de multiples technologies de production des biocarburants liquides

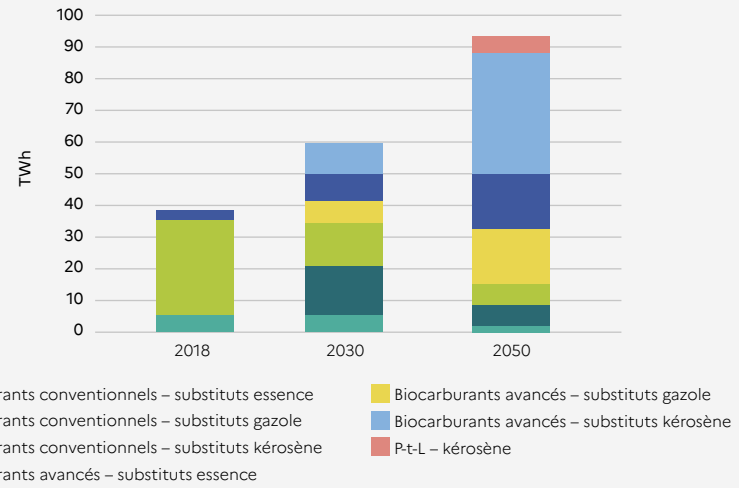
Ce scénario est guidé par une recherche de la croissance et de technologies vertes, qui doivent permettre de décarboner l'offre énergétique du secteur du transport. La demande est peu contrainte. Les principales évolutions visées concernent l'efficacité énergétique et surtout la décarbonation de l'énergie, avec une électrification importante. La demande en carburants liquides s'élève à 125,9 TWh en 2050, soit une baisse de 76 % par rapport à aujourd'hui.

Au total, 98 TWh de biocarburants liquides et d'électro-carburants sont produits. Toutes les technologies de production de carburants liquides renouvelables disponibles sont mises à contribution, même les plus coûteuses. Pour les biocarburants conventionnels, les mêmes hypothèses de production agricole sont maintenues avec les mêmes rendements, surface agricole et unités de production que dans S1 et S2. La filière des biocarburants avancés se développe de manière conséquente. Une priorité est donnée pour favoriser l'utilisation de biomasse lignocellulosique et de déchets bois en vue d'une valorisation énergétique. S3 est, avec S4, le scénario où la consommation de ressource lignocellulosique est la plus élevée (11,6 MtMS[21]). En effet, de la surface est libérée pour la production de la lignocellulose à partir notamment de taillis à croissance rapide (TCR) (miscanthus). Ce gisement élevé permet une large production de biocarburants liquides *via* la filière B-t-L. La technologie P-t-L contribue à la production de carburants liquides à hauteur de 4,5 TWh. La filière algale est également développée pour la production de biocarburants, la filière 3G représente 12 %[22] de la production de biocarburants liquides.

Le *Graphique 7* synthétise l'évolution de la production des biocarburants par catégorie et substituts de 2018 à 2050. Le niveau de production de biocarburants maximum est presque atteint dès 2030. En effet, l'encadrement fort de l'État pour développer la filière biocarburants se met en place rapidement pour avoir des capacités de production importantes dès 2030. Cet effort se traduit par :

- un développement de la ressource : un changement des cultures avec l'introduction de ressources lignocellulosiques sur des terrains agricoles. Des cultures de type miscanthus ou switchgrass sont implantées puis valorisées. De plus avec l'évolution des systèmes agricoles, notamment le développement de l'agroforesterie, les ressources de bois hors forêt (haies, vergers…) augmentent significativement, ce qui dégage plus de biomasse lignocellulosique. Aussi, la priorité est donnée à la valorisation énergétique des déchets bois plutôt que la valorisation matière (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*) ;
- un développement des technologies : dans la logique des technologies vertes, il a été supposé le développement de procédés plus efficients pour la production de biocarburants avancés (voie B-t-L). Il est également fait l'hypothèse de l'amélioration du rendement de la conversion de la biomasse en

Graphique 7 Évolution temporelle de la production des biocarburants dans S3



21 Million de tonnes de matière sèche.
22 Hors production des carburants de synthèse.

biocarburants d'un facteur 2 entre S1-S2 et S3-S4 d'où une plus grande production de biocarburants *via* la voie B-t-L. Ces améliorations technologiques vont conduire à une plus grande production des biocarburants avancés entre 2030 et 2050. La mise en place de production de biogazole et de bioJet-Fuel *via* la 3G avec le développement de la filière algale permet aussi d'augmenter la part des biocarburants avancés.

Les substituts essence représentent 28 % des biocarburants liquides produits, les substituts gazole 24 % et les substituts kérosène 48 %. Par ailleurs, 11 % de la production globale (hors électro-carburants) sont destinés au besoin GNR soit 10,4 TWh. Pour les substituts essence, la production de bioéthanol provient essentiellement de la biomasse lignocellulosique (57 % du bioéthanol produit). Pour le substitut gazole, les biocarburants avancés sont majoritaires avec 60 % de la part de substituts gazole. De même, la production de bioJetFuel est réalisée essentiellement à partir des mêmes ressources et des mêmes procédés avec 74 % de la part des substituts kérosène. Dans ce scénario, les biocarburants avancés deviennent majoritaires pour les trois catégories de carburants notamment *via* le déploiement du B-t-L *(Tableau 9)*.

Globalement, l'offre biocarburants répond à 75 % du besoin en biocarburants du secteur des transports.

Tableau 9 Offre totale de biocarburants par typologie de substituts dans S3

Biocarburants	Production (TWh)				Part biocarburants liquides par rapport à la demande totale en carburants liquides (%)
	Hors soutes*	Soutes DOM	Soutes	TOTAL	
Substitut diesel	12,6	-	-	12,6	**100**
Substitut essence	8,8	-	-	8,8	**100**
Substitut kérosène	10,5	14,2	35,3	60	**68**
Substitut fioul	-	-	9,7	9,7	**76**
Substitut gazole pour maritime, fluviale et ferroviaire	3,1	-	-	3,1	**100**
TOTAL substituts	69,7	14,2	46	94,2	**75**

* Inclus tous les modes de transport (terrestre, ferroviaire, maritime et fluvial).

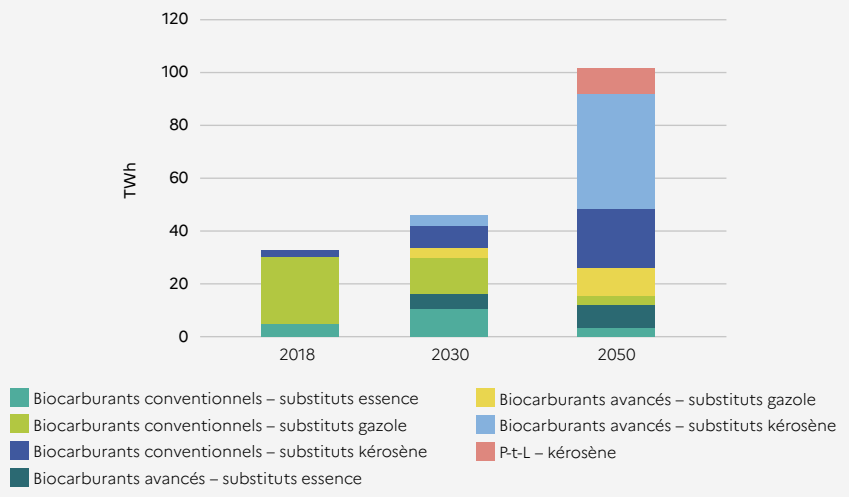
4.5. Scénario 4 : un fort développement des solutions technologiques

Ce scénario est guidé par une recherche technologique forte pour décarboner l'offre énergétique croissante du secteur du transport. La demande n'est pas contrainte. Les principales évolutions visées concernent l'efficacité énergétique et surtout la décarbonation de l'énergie, avec une très forte électrification (plus de 70 % pour le hors soutes). Cela est possible grâce aux progrès technologiques sur le stockage des batteries qui peuvent investir différents marchés y compris les usages pour les véhicules lourds et la longue distance. La demande en carburants liquides s'élève à 143 TWh en 2050, soit une réduction de 73 % par rapport à aujourd'hui.

Au total, 112 TWh de biocarburants liquides et d'électro-carburants sont produits. Toutes les technologies de production de carburants liquides renouvelables disponibles sont mises à contribution, même les plus coûteuses. Pour les biocarburants conventionnels, les mêmes hypothèses de la production agricole avec les mêmes rendements, surface agricole et unités de production que dans S1 et S2 sont maintenues. Les filières des biocarburants avancés se développent de manière conséquente. L'utilisation de biomasse lignocellulosique et des déchets bois en vue d'une valorisation énergétique est favorisée. La consommation de ressource lignocellulosique est très élevée (11,4 MtMS). Une augmentation de la production des taillis à croissance rapide (TCR) est prévue. En plus de ce gisement, 3 Mt de CSR sont mobilisées pour augmenter la part de biocarburants liquides *via* la filière B-t-L. La technologie P-t-L contribue à la production d'électro-carburants à hauteur de 9,2 TWh. Toutes les technologies sont déployées pour répondre à la demande et à l'objectif de neutralité carbone. La filière algale est également développée pour la production de biocarburants, la filière 3G représente 11 %[23] de la production de biocarburants liquides.

Le *Graphique 8* synthétise l'évolution de la production des biocarburants par catégorie et substituts de 2018 à 2050. Le niveau de production de biocarburants est élevé dès 2030, avec plus de 80 TWh de productions de biocarburants. Comme pour S3, cela s'explique par une part plus importante en biomasse lignocellulosique qui se développe avant 2030. Toutes les technologies de production de biocarburants sont développées avec une optimisation des procédés et des rendements. Comme pour S3, ces améliorations technologiques vont conduire à un basculement entre 2030 et 2050 avec une part plus importante des biocarburants avancés comparés aux biocarburants conventionnels.

Graphique 8 Évolution temporelle de la production des biocarburants dans S4



23 Hors production des carburants de synthèse.

Les substituts essence représentent 11 % des biocarburants liquides produits, les substituts gazole 9 % et les substituts kérosène 70 %. Par ailleurs, 10 % de la production globale (hors électro-carburants) sont destinés au besoin GNR soit 10,4 TWh. Pour les substituts essence, la production de bioéthanol provient pour moitié des ressources agricoles et pour l'autre moitié des ressources lignocellulosiques, coproduits et déchets entre autres. Pour les substituts gazole, toutes les ressources disponibles sont utilisées et les biocarburants avancés représentent 73 % de la part des substituts gazole. De même, la production de bioJetFuel est réalisée essentiellement avec les mêmes ressources et procédés que les substituts gazole. La part des biocarburants avancés représente 63 % de la part des substituts kérosène et 14 % proviennent du P-t-L. Les biocarburants avancés deviennent majoritaires pour les deux catégories de carburants (gazole et kérosène) avec un très fort développement de la production des substituts kérosène pour répondre à une demande importante du secteur aérien. Les autres substituts de carburants liquides sont moins sollicités *via* le développement poussé des autres mobilités (mobilité électrique, hydrogène…).

Globalement, l'offre biocarburants répond à 71 % du besoin biocarburants du secteur des transports. Une partie est réalisée par les carburants de synthèse *(Tableau 10)*.

Tableau 10 Offre totale de biocarburants par typologie de substituts dans S4

Biocarburants	Production (TWh)				Part biocarburants liquides par rapport à la demande totale en carburants liquides (%)
	Hors soutes*	Soutes DOM	Soutes	TOTAL	
Substitut diesel	7	-	-	7	**81**
Substitut essence	12,6	-	-	12,6	**100**
Substitut kérosène	11,4	17,2	45,4	74	**70**
Substitut fioul	-	-	5,2	5,2	**41**
Substitut gazole pour maritime, fluviale et ferroviaire	2,7	-	-	2,7	**82**
TOTAL substituts	33,7	17,2	50,6	101,5	**71**

* Inclus tous les modes de transport (terrestre, ferroviaire, maritime et fluvial).

FOCUS

Produits biosourcés

Le chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse* décrit les différentes biomasses et ses usages dont les produits biosourcés. Ici, seront uniquement détaillées les hypothèses et modélisations pour deux intermédiaires largement utilisés dans l'industrie chimique : l'éthylène et le naphtalène. Ces deux intermédiaires peuvent être obtenus *via* la filière biocarburants liquides en tant que coproduits pour le bionaphtalène et *via* la déshydratation du bioéthanol pour le bioéthylène. Ainsi, il a été considéré le potentiel de production du bioéthanol et du bionaphtalène issus des filières biocarburants déployées en fonction du cadrage des scénarios. Il a été également considéré la production de méthanol à partir de la filière P-t-L pour la demande en méthanol propre ou pour compléter la demande en éthylène.

5. Les biocarburants, principale source des matières biosourcées

5.1. Hypothèses considérées pour les produits biosourcés

Dans ces travaux, la demande en substituts biosourcés provient de l'industrie (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). Le secteur de la chimie a été modélisé à travers quatre principaux intermédiaires : les oléfines (pour la filière plastique), le méthanol, l'ammoniac et le dichlore. Dans le cas des produits biosourcés, seuls les oléfines (plus exactement l'éthylène) et le méthanol ont été étudiés comme molécules cibles en les substituant par du bioéthanol et du bionaphtalène pour l'éthylène et du méthanol de synthèse (issu des voies de valorisation du CO_2) pour le méthanol fossile.

Dans les différents scénarios, il a été pris en compte la demande en biomasse pour :

- les matériaux biosourcés pour la construction dans le secteur du bâtiment (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*) ;
- les matières premières de base dans l'industrie chimique : le bionaphtalène et le bioéthanol en tant que coproduits des biocarburants (présents dans ce chapitre mais voir aussi chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

BIONAPTHALÈNE ET BIOÉTHANOL

Le bionaphtalène et le bioéthanol sont des coproduits des filières biocarburants. Plus exactement, le bionaphtalène est un coproduit de la filière biogazole/bioJetFuel alors que le bioéthanol a été estimé sur la base de la disponibilité de la biomasse pour produire du bioéthanol en surplus par rapport à la demande du secteur des transports.

MÉTHANOL

Afin de répondre à la demande du secteur de l'industrie chimique, il a été estimé un complément en méthanol issu de la valorisation du CO_2. Il a été supposé que cette technologie atteigne la maturité industrielle en 2050 et soit disponible dans les différents scénarios à différentes échelles de développement. Le P-t-L est déployé à large échelle uniquement dans S3 car il y a un encadrement fort de l'État pour le développement de solutions de décarbonation. Pour les autres scénarios, le P-t-L sert d'appoint pour compléter l'offre des produits biosourcés.

Le volume nécessaire en CO_2 pour la synthèse du méthanol provient en totalité de sources biogéniques comme le captage de CO_2 sur des unités de méthanisation ou de bioraffineries qui sont généralement proches des usines utilisant le méthanol ou l'éthylène.

AUTRES INTRANTS

En complément au bionapthalène et au méthanol issu du P-t-L, il a aussi été considéré l'apport de plastique recyclé *via* un recyclage chimique comme intrant matière dans les vapocraqueurs. Pour répondre à toute la demande du secteur chimie, l'offre était complétée par du naphtalène fossile (*via* des importations).

LES AUTRES PRODUITS BIOSOURCÉS

Une étude ADEME [19] a montré que le développement des produits biosourcés aurait peu d'impacts sur la ressource biomasse en mobilisant moins de 2 % de la surface agricole utile (SAU). Ainsi, aucune modélisation n'a été réalisée pour les autres produits biosourcés. En effet, en se basant sur ces travaux, des hypothèses ont été formulées avec quelques ajustements. Les tonnages 2020 prévus ont été revus à la baisse car le prix du pétrole n'a pas été favorable au développement des produits biosourcés. Seuls les isolants, bétons et produits cosmétiques ayant un taux de pénétration du marché déjà important continuent de croître étant donné soit leur haute valeur ajoutée pour les cosmétiques soit leurs propriétés techniques (isolants). Avec une augmentation des tonnages des principaux produits chimiques en 2050 *(Tableau 11)*, il est observé un très faible impact sur les surfaces agricoles nécessaires pour produire les matières premières (inférieures à 2,5 % de la SAU).

Tableau 11 Estimations des tonnages de différents produits chimiques à horizons 2030 et 2050 avec une poursuite des tendances (BAU)

Catégorie de produits	2012 étude	2020 BAU	2030 BAU, leadership du fossile	2050 BAU, leadership du fossile
Colles	33	50	50	55
Composites	29	90	130	210
Détergents	86	85	86	88
Encres	22	24	20	20
Isolants	125	180	280	400
Bétons	140	207	227	267
Lubrifiants	65	90	90	95
Peintures	23	41	41	45
Cosmétiques	900	1 050	1 290	1 500
Plastiques	45	105	105	105
TOTAL	**1 468**	**1 922**	**2 319**	**2 785**

5.2. Une place des produits biosourcés variable en fonction des scénarios

Le *Tableau 12* récapitule en millions de tonnes (Mt) le tonnage de bionaphtalène et de bioéthanol issus de la production des biocarburants pour l'industrie chimique dans les différents scénarios en 2050.

Le *Tableau 13* présente la disponibilité en biomasse pour les biocarburants pour chaque scénario. Le scénario 1 présente une forte disponibilité en céréales (4,82 MtMB) et en betteraves (5,7 MtMB). Les autres scénarios présentent une baisse significative de la disponibilité des céréales ce qui a pour conséquence la faible disponibilité de bioéthanol pour la chimie voire l'absence de bioéthanol pour les scénarios tendanciel et 2. Les scénarios 3 et 4 permettent de dégager un excédent de bioéthanol qui peut être réorienté vers la chimie.

La disponibilité en bionaphtalène a été calculée à partir de la production des HVO dont le bionaphtalène est un coproduit et des unités B-t-L lorsque cette technologie était présente. Quand il y avait assez de bioéthanol pour répondre à la demande en essence du secteur des transports, toute la fraction de bionaphtalène a été valorisée vers la chimie. Pour compléter l'offre bionaphtalène, il a été également considéré la disponibilité en plastiques recyclés et le besoin de naphtalène fossile (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*) pour répondre à la demande de chaque scénario.

Tableau 12 Tonnage de bioéthanol et bionaphtalène pour l'industrie chimique (Mt)

Produits	TEND	S1	S2	S3	S4
Bioéthanol	0	0,16	0	0,18	0,11
Bionaphta	0,095	0,45	1,79	3,01	3,61

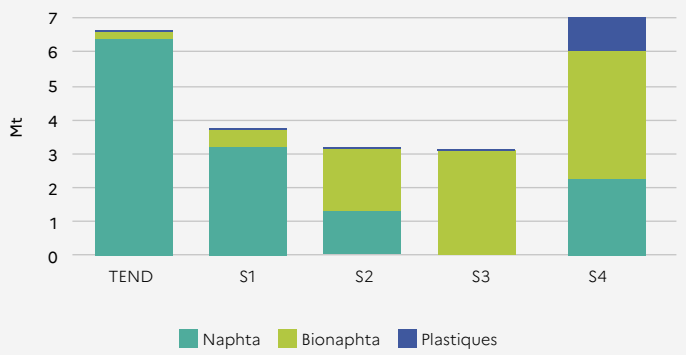
Tableau 13 Disponibilité en biomasses agricoles de matière brute (MB)

Productions agricoles	TEND	S1	S2	S3	S4
Céréales	1,66	4,82	2	2,43	2,94
Betterave	1,52	5,7	5,7	5,7	5,7

Le *Graphique 9* montre la répartition entre les différents intrants matières de naphtalène pour la production d'éthylène. Le naphtalène d'origine fossile est majoritaire dans le scénario tendanciel alors que pour les autres, la part biosourcée est plus importante, surtout dans S3 et S4 où il y a une forte utilisation de la biomasse pour la production de biocarburants ce qui permet de répondre à la demande de naphtalène.

Ainsi dans S4, l'offre biosourcée permet de répondre à plus de 50 % de la demande de l'industrie. Dans S3, la part biosourcée du napthalène consommé semble majoritaire car l'autre source d'éthylène provient du méthanol issu du P-t-L mais n'apparaît pas dans le graphique (*cf. section 5.2.2*).

Graphique 9 Répartition des sources de naphta



5.3. Le méthanol : dépendant du développement de la filière *power-to-liquid*

L'autre intermédiaire chimique qui a été modélisé pour répondre à la demande de la chimie est le méthanol. Le *Tableau 14* récapitule la demande en CO_2 en Mt par scénario en 2050 pour la production de méthanol à partir de l'hydrogène et du CO_2, pour son usage direct dans la chimie ou comme intermédiaire pour la synthèse d'éthylène. Le P-t-L est minoritaire dans la plupart des scénarios (S1, S2 et S4). Dans S1 et S2, la demande en plastiques a fortement baissé ce qui permet de limiter le besoin en P-t-L. De plus, il s'agit d'une technologie peu mature et donc avec un développement limité dans S1 et S2. Pour S4, le P-t-L est aussi minoritaire car il s'agit du scénario avec le développement technologique le plus important, donc les parts de plastiques recyclés et de produits biosourcés sont poussées au maximum. De plus, la consommation en produits pétroliers reste importante *via* des importations du naphtalène. Le scénario 3 est celui avec un large développement du P-t-L pour répondre à la demande en intrants matières pour la chimie, car il s'agit du scénario avec un fort encadrement de l'État pour le développement de solutions de décarbonation. Ainsi, malgré son coût élevé, cette technologie est mise en place pour ne pas avoir recours à l'importation de ressources fossiles.

Tableau 14 Volume de CO_2 pour répondre à la demande en méthanol

Besoins en CO_2 (Mt)					
	TEND	S1	S2	S3	S4
CCU* H_2 pour éthylène	0	0	0	3,65	0
H_2 méthanol autre (hors oléfine)	0,76	0,71	0,65	0,75	0,73
TOTAL	0,76	0,71	0,65	4,4	0,73

* Captage et utilisation du CO_2.

6. Une contribution significative des biocarburants dans le secteur des transports mais insuffisante

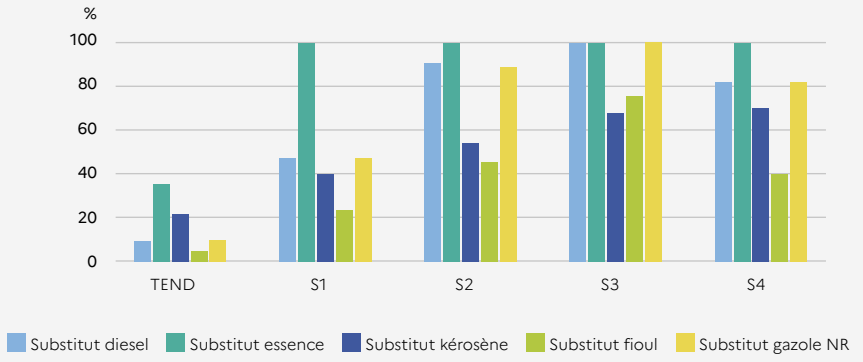
6.1. Une offre biocarburants incomplète pour répondre à la demande du secteur des transports

L'offre biocarburants même complétée en carburants de synthèse ne permet pas de répondre à la demande du secteur des transports dans aucun des scénarios.

Les biocarburants arrivent à répondre à la demande du transport terrestre mais pas complètement (100 % de la demande pour l'essence dans S1 et 100 % pour l'essence et 90 % pour le diesel dans S2). Il est observé dans S1 et S2 une inversion entre la consommation de gazole et de l'essence qui débute dès 2030 avec une confirmation en 2050. L'une des explications est l'augmentation des véhicules à essence et une réduction drastique des véhicules Diesel pour les particuliers. Cette hypothèse se vérifie dès aujourd'hui avec les ventes de véhicules particuliers neufs Diesel qui ne représentent plus que 22,5 % des ventes sur les huit premiers mois de 2021[24]. Ce sont les ventes de véhicules hybrides essence non rechargeables et rechargeables qui viennent se substituer aux achats antérieurs de véhicules Diesel (*cf. section 1.1*).

Dans S3, 100 % de la demande en substituts essence, diesel et gazole non routier sont atteints grâce à une offre de biocarburants plus importante *via* un développement fort des biocarburants avancés. Cette substitution complète est permise par la diversification des ressources grâce à une augmentation des cultures lignocellulosiques et au développement important du B-t-L et de la voie biochimique. Malgré une forte diminution de la demande du secteur aérien, les biocarburants n'arrivent pas à répondre totalement à la demande en kérosène. Ils arrivent toutefois à augmenter la part de renouvelable de ce secteur qui est difficile à décarboner vu le peu d'alternatives. Hormis le scénario tendanciel, le kérosène consommé correspond à plus de 50 % de biocarburants, plus précisément, la part varie entre 51 % dans S1 et jusqu'à 75 % dans S3. Il est à noter que le complément d'électro-carburants (e-kérosène) est produit pour répondre à la demande en kérosène. Le *Graphique 10* représente la part de biocarburants qui a pu être produite pour répondre à la demande du secteur des transports par catégorie de carburants.

Graphique 10 Pourcentage de l'offre biocarburants par rapport à la demande du secteur des transports en 2050 par scénario



24 Source : PFA/AAA Data.

La forte contrainte sur la biomasse dans S1 limite fortement le développement des biocarburants avancés dans ce scénario. Ce sont donc les biocarburants conventionnels, déjà développés, qui sont prédominants. Cela se traduit par une forte production agricole (betteraves et céréales) et une augmentation de la production des oléagineux *(Graphique 11)*. La demande en huiles est complétée par des importations (hors soja et palme) mais avec un niveau d'importation presque identique à celui d'aujourd'hui (1,4 Mt d'huiles importées sur les 2,1 Mt utilisées pour la production des biocarburants).

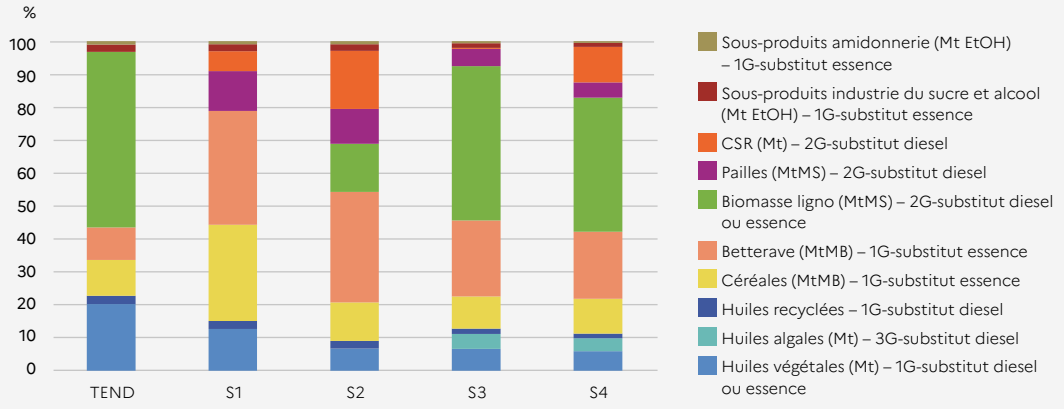
Dans S2, le développement des biocarburants avancés est permis grâce à une plus grande disponibilité de la biomasse lignocellulosique (2,5 MtMS) mais qui reste limitée. La filière B-t-L se développe en diversifiant les intrants matières (cultures lignocellulosiques et paille notamment). Ainsi, la production des biocarburants avancés devient majoritaire en représentant presque 60 % de l'offre biocarburants. La filière biocarburants conventionnels se maintient mais avec une part plus faible des huiles vierges (1,14 Mt dont 0,8 Mt d'huiles vierges importées) et devient un complément pour répondre à la demande du secteur des transports.

Dans S3 et S4, le fort développement technologique des procédés de conversion de la biomasse en plus de la disponibilité de la biomasse lignocellulosique (environ 11 MtMS) permet à la filière B-t-L d'être le principal procédé pour la production des substituts gazole et kérosène. La filière algale se développe également en réussissant à lever les principaux verrous et représente presque 50 % de la ressource en huiles pour les deux scénarios (1,11 Mt d'huiles algales contre 1,65 Mt d'huiles oléagineuses dont 1,3 et 1 Mt respectivement pour S3 et S4 qui sont importées). Les biocarburants avancés dans ces deux scénarios représentent plus de 70 % de l'offre biocarburants.

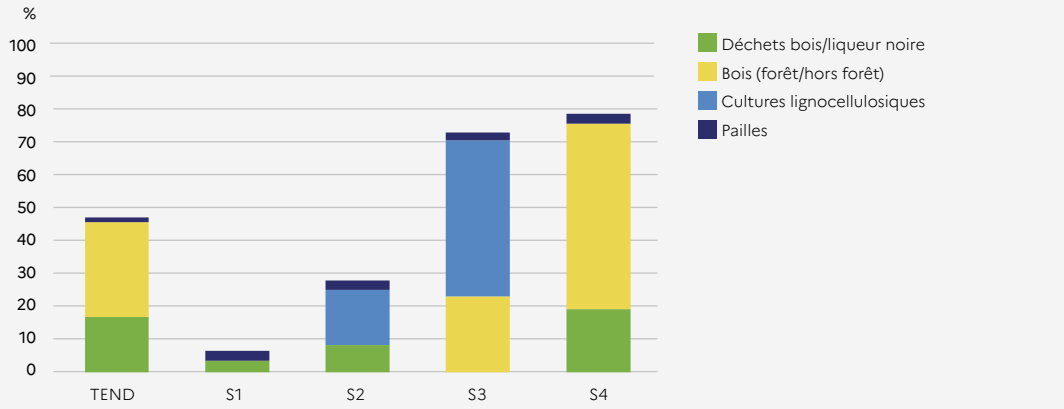
Focus sur la biomasse lignocellulosique

Dans cet exercice prospectif, l'utilisation du terme « biomasse lignocellulosique » regroupe différentes matières premières : cultures lignocellulosiques, plaquettes forestières (forêt/hors forêt), pailles et déchets bois/liqueur noire *(Graphique 12)*. L'augmentation significative de la ressource lignocellulosique dans S3 et S4 illustre la diversification de la matière première pour les procédés B-t-L et biochimique.

Graphique 11 *Répartition des ressources biomasse pour chacun des scénarios*



Graphique 12 *Part des différentes ressources regroupées sous la catégorie biomasse lignocellulosique*



IMPACT DES BIOCARBURANTS SUR LA SAU (CULTURES AGRICOLES ET LIGNOCELLULOSIQUES)

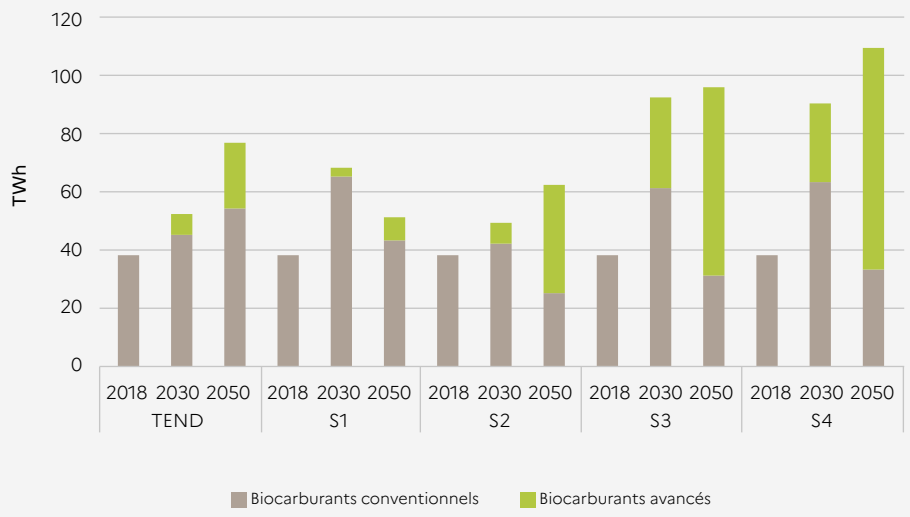
Le développement et l'utilisation de la biomasse pour des usages non alimentaires sont détaillés dans le chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*. La production agricole (colza, céréales et betteraves) et la production lignocellulosique pour la production des biocarburants liquides représente une faible part de la SAU totale. Les scénarios 1 et 3 sont ceux qui occupent le plus de surface, environ 6 % de la SAU totale *(Tableau 15)*. Pour S1 cela s'explique par l'utilisation en majorité de ressources agricoles (céréales, betteraves et colza) alors que dans S3, la culture lignocellulosique est plus importante pour répondre aux besoins de production de biocarburants avancés. Dans les autres scénarios, moins de cultures agricoles sont utilisées notamment dans S4 où une part importante de plaquettes bois est utilisée pour les biocarburants liquides.

Les ressources disponibles ont plus ou moins orienté le type de biocarburants produits entre conventionnels (céréales, betteraves, oléagineux) et avancés (biomasse lignocellulosique, coproduits bois, résidus, déchets, microalgues) en fonction du cadrage des scénarios. Cette disparité entre les ressources fait ressortir une place plus importante pour les biocarburants avancés dans S3 et S4 où il y a un fort développement technologique de ces nouvelles filières. Même constat dans S2 mais de manière moindre car il y a une contrainte plus forte sur la ressource lignocellulosique. À l'inverse, les biocarburants conventionnels restent majoritaires dans S1. Le *Graphique 13* montre cette évolution entre les biocarburants conventionnels et avancés pour chacun des scénarios.

Tableau 15 Comparaison de la SAU affectée à la production des biocarburants liquides par rapport à la SAU totale

	TEND	S1	S2	S3	S4
SAU affectée aux biocarburants (Mha)	1,5	1,6	1,1	1,6	0,9
SAU totale (Mha)	25,1	25,7	27,7	27,2	26,7

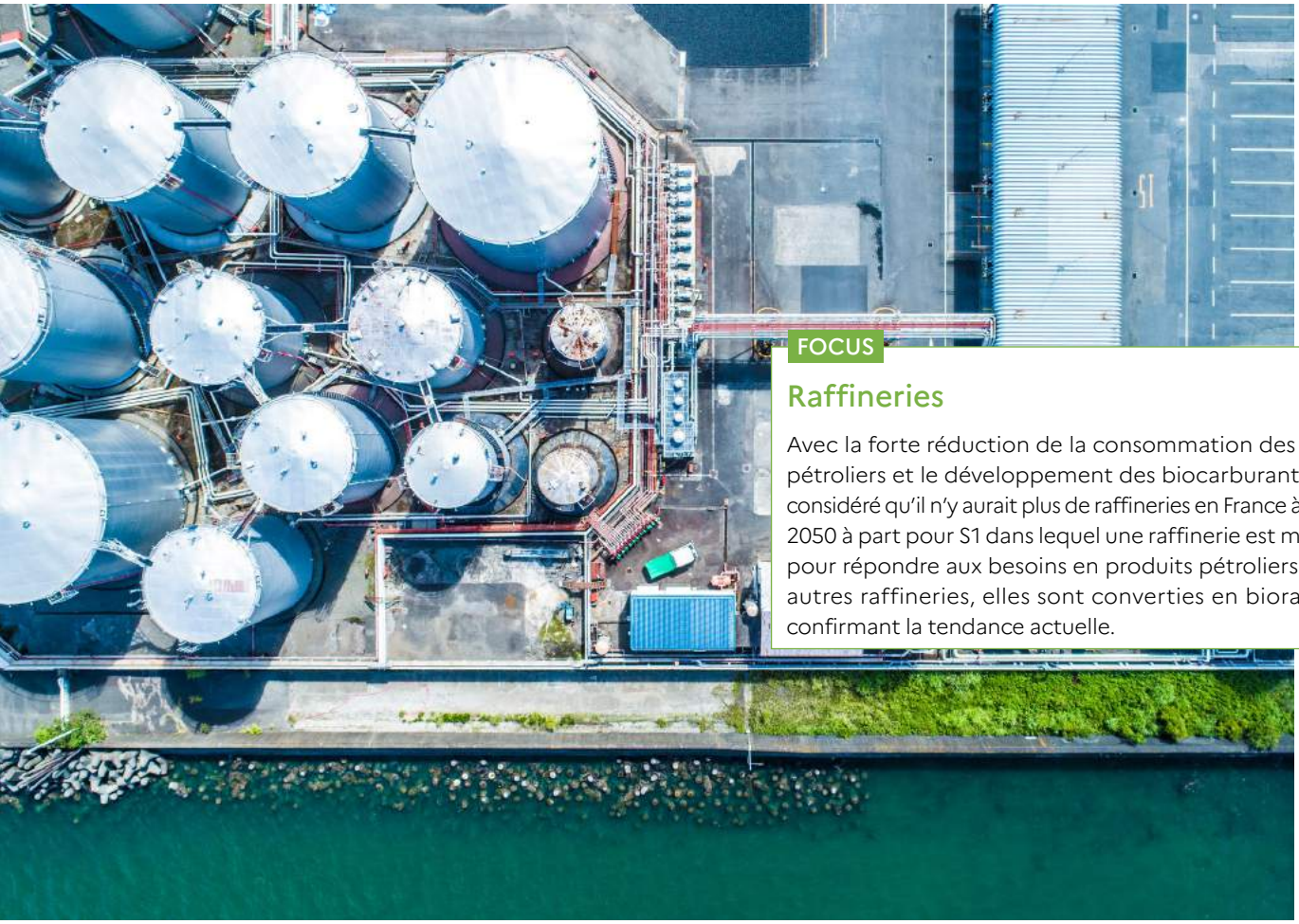
Graphique 13 Part de biocarburants conventionnels et avancés pour chaque scénario en 2018, 2030 et 2050



Comme expliqué précédemment, il a été nécessaire de compléter l'offre de biocarburants par des électro-carburants pour limiter le recours aux produits pétroliers. Le *Tableau 16* synthétise la part de production des électro-carburants *via* le P-t-L ainsi que la consommation électrique correspondante, pour chacun des scénarios. *A priori*, les électro-carburants pourraient être une solution pour réduire la pression sur la biomasse mais la forte consommation électrique de ce procédé transfère la pression sur le système électrique. D'où l'absence de recours aux électro-carburants dans S1 qui est un scénario avec un faible développement technologique et une très forte sobriété. S4, orienté vers la technologie, ne nécessite pas une forte pénétration des électro-carburants car l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie est très développée.

Tableau 16 Offre P-t-L pour chaque scénario avec la consommation électrique correspondante

Scénarios	TEND	S1	S2	S3	S4
Besoin identifié (TWh)	206,6	33,7	18	4,5	9,2
Offre possible (TWh) *via* le P-t-L	4,5	-	9,1	4,5	9,2
Consommation équivalente en électricité (TWh)	9	-	18,2	9	18,5



FOCUS

Raffineries

Avec la forte réduction de la consommation des produits pétroliers et le développement des biocarburants, il a été considéré qu'il n'y aurait plus de raffineries en France à l'horizon 2050 à part pour S1 dans lequel une raffinerie est maintenue pour répondre aux besoins en produits pétroliers. Pour les autres raffineries, elles sont converties en bioraffineries confirmant la tendance actuelle.

6.2. La progression des biocarburants liquides représente un défi majeur

Face à une situation où les biocarburants représentent 8 % du mix énergétique du transport[25], la décarbonation du transport d'ici 2050 est un enjeu de taille. **Cette décarbonation devra nécessairement passer par une diminution de la consommation de carburants liquides ainsi que par un développement des carburants liquides biosourcés et de synthèse**, notamment pour les usages qui ne peuvent être facilement substitués par d'autres vecteurs énergétiques renouvelables.

Du côté du secteur du transport, S1 et S2 font des choix de sobriété forts qui se traduisent par une modération de la demande, un report modal et un remplissage des véhicules important. La demande globale du transport est moins contrainte dans S3 et S4, qui agissent davantage sur les leviers technologiques d'efficacité et de substitution des motorisations par d'autres vecteurs énergétiques (gaz, hydrogène et électricité). Ces évolutions se traduisent dans tous les scénarios **par une demande en carburants liquides qui chute par rapport à aujourd'hui** (entre - 73 % et - 86 %) et qui se focalise sur les usages difficiles à substituer comme le secteur de l'aérien mais aussi le transport maritime et fluvial ou le transport des marchandises.

Malgré cette forte baisse dans tous les scénarios, **la substitution totale des carburants liquides du secteur des transports par des ressources renouvelables n'est jamais atteinte**, en particulier pour l'aérien et le maritime. Cette situation est due aux limites physiques de la biomasse et de l'électricité mobilisable pour la production de biocarburants liquides et d'électro-carburants. Elle montre également que toutes les filières de production de biocarburants liquides et d'électro-carburants devront être mobilisées et optimisées pour contribuer à l'objectif de neutralité carbone. En particulier, **la production de biocarburants doit s'appuyer sur une biomasse variée afin de limiter la pression sur certaines catégories de biomasse et préserver le puits biologique.**

La filière des biocarburants conventionnels est nécessaire pour l'augmentation de la part de renouvelable des carburants liquides, quel que soit le scénario. Actuellement, cette filière est la seule voie mature de production de carburants liquides renouvelables. La production de biocarburants conventionnels est majoritaire dans S1 mais devient minoritaire dans les autres scénarios par rapport à aujourd'hui (elle varie entre 25 TWh dans S2 à 43 TWh dans S1). Son développement est toutefois limité par la concurrence avec l'alimentation.

La deuxième voie fondamentale de développement des carburants liquides renouvelables repose sur les biocarburants liquides avancés. Son développement est aussi limité par les ressources disponibles. Il dépend en effet tout d'abord des politiques de gestion des forêts et des déchets. Celles-ci déterminent les ressources totales de biomasse et déchets carbonés non recyclables. Il dépend en outre des autres usages de ces intrants pour la fabrication de matériaux, la combustion directe ou la production de gaz. Ainsi, dans S1, la filière ne se développe qu'à la marge en raison de la tension sur la ressource. S3 et S4 mobilisent de leur côté largement la biomasse, ce qui permet un fort développement de la filière (elle varie entre 8 et 76 TWh en fonction des scénarios soit 15 % et 70 % d'augmentation).

Face à ces limites de mobilisation de la biomasse, **les électro-carburants peuvent être un complément** à la production de carburants liquides renouvelables. Leur développement est toutefois limité par les volumes d'électricité requis et peut se trouver en concurrence avec la croissance des usages directs de l'hydrogène ou du *power-to-gas* (production de méthane à partir de l'hydrogène et du CO_2).

La production des biocarburants à partir des microalgues n'a été considérée que dans S3 et S4 où un fort soutien au développement technologique est organisé soit par l'État soit par les acteurs de la filière. Il est estimé que le développement de la filière microalgues sera d'abord pour les autres marchés (alimentaire, cosmétique, chimie) avant le marché des carburants qui apparaît comme minoritaire. Ainsi dans S3 et S4, la part des biocarburants issus des microalgues représente respectivement 12 % et 11 %, ce qui reste une contribution modeste. Cette faible part s'explique par la faible maturité actuelle de cette technologie. Il a donc été jugé prudent d'estimer un développement limité à l'horizon 2050. Au-delà, cette filière pourrait se développer plus largement.

25 L'électricité représente environ 2 % des consommations du transport, essentiellement dans le ferroviaire.

6.3. Un encadrement *via* des politiques publiques s'avère incontournable pour le développement des filières biocarburants

La mise en place de mécanismes de soutien pour la production à large échelle multiproduits (biocarburants et produits biosourcés) dans des bioraffineries permettrait des cobénéfices, généralement liés à la valorisation de coproduits et autres sous-produits générés par ces secteurs et ainsi permettre une optimisation de l'utilisation de la biomasse. Par exemple, pour la filière agricole, les biocarburants peuvent représenter un moyen pour les agriculteurs de diversifier leurs débouchés et leurs revenus.

Afin de ne pas fausser la concurrence et garantir au consommateur un produit à haute performance environnementale, notamment en ce qui concerne la durabilité de la biomasse, il serait nécessaire de mettre en place un système de certifications de production durable au niveau européen et international. La RED II a déjà ce rôle en Europe mais il faudrait la mise en place d'un système commun de certification au niveau international.

Une filière française de biocarburants pourrait apporter un bénéfice à la balance commerciale et à l'indépendance énergétique. Néanmoins, un soutien public reste indispensable afin de compenser le surcoût des biocarburants liquides en comparaison de leurs équivalents fossiles. De manière générale, le prix du carbone (taxe, quotas d'émissions) actuel est trop bas et trop fluctuant pour rendre les biocarburants durablement compétitifs.

Afin de favoriser le développement des biocarburants avancés, les soutiens publics en matière de R&D doivent être poursuivis pour le développement de procédés performants. La mise en place de filière de récupération des déchets est aussi incontournable pour améliorer l'accès à ce type de matières premières. D'autres mesures politiques présentent un levier intéressant. On peut noter, par exemple, la commande publique avec des quotas de véhicules bas carbone dans les flottes des administrations, la poursuite des incitations économiques type prime à la conversion et bonus-malus pour les véhicules bas carbone.

7. Des incertitudes restent à lever

- **Limite liée aux hypothèses de disponibilité de la ressource** : l'effet du changement climatique a été pris en compte par des rendements conservateurs pour les cultures et par l'hypothèse d'un climat aggravé pour la forêt, mais ces modélisations ont bien sûr leurs limites. Pour la forêt en particulier, la modélisation des ressources tient compte des effets directs du changement climatique (modification des précipitations et de la température) mais de grandes incertitudes persistent sur l'impact des perturbations extrêmes (canicules, incendies, tempêtes, crises sanitaires).

- **Limite sur les évolutions techniques des filières de production** : la première source d'incertitude des scénarios d'offre en biocarburants liquides et d'électro-carburants jusqu'en 2050 concerne les évolutions techniques des filières de production. La filière B-t-L est actuellement au stade démonstrateur et il n'existe aucune unité en fonctionnement à l'échelle industrielle. Les incertitudes techniques, en particulier sur les rendements de conversion, sont donc importantes, d'autant plus que les hypothèses d'optimisation énergétique à 2050 sont très optimistes. En effet, les hypothèses de rendement énergétique, qui peuvent varier notamment en fonction des intrants pour la gazéification de la biomasse ligneuse propre ou des CSR, ont été établies d'après les retours d'expérience d'un faible nombre de pilotes et de démonstrateurs, en France et dans le monde. Quant aux autres technologies, la filière algale et le *power-to-liquid* sont encore au stade R&D. Pour ces deux filières, des précautions s'imposent donc au sujet des hypothèses de rendement de conversion et des volumes globaux de carburants liquides produits.

- **Limite sur le déploiement des biocarburants d'un point de vue sociétal** : la production et l'exploitation de biomasse pour les biocarburants font face à une perception négative par la population en raison de ses impacts environnementaux notamment *via* le CAS, sur le stockage de carbone dans les sols ou la biodiversité.

Un autre enjeu sociétal concerne le risque de concurrence avec l'alimentation et notamment des effets sur le prix des matières premières agricoles.

- **Limite sur la décarbonation effective du secteur des transports *via* les biocarburants** : les biocarburants étant utilisés dans le secteur des transports, c'est le facteur d'émission des carburants lors de sa combustion qui est considéré. Les émissions sont calculées du réservoir à la roue du véhicule et le CO_2 biogénique, contenu dans les biocarburants, est considéré comme nul. L'empreinte GES de la production de la biomasse a été considérée dans la partie agricole. Ainsi, en fonction de la biomasse et de son origine, la réduction des gaz à effet de serre liée à l'utilisation d'un biocarburant comparé à un carburant fossile peut varier entre 60 à 80 % généralement. Mais il faudrait aussi considérer les effets directs et indirects de changement d'affectation des sols liés au développement des filières non alimentaires ou à l'évolution des productions alimentaires, ce qui n'a pas pu être pris en compte dans le cadre de cet exercice. Cette analyse nécessite l'utilisation de modèles globaux à l'échelle de la planète.

- **Limite de l'échelle macro : quel impact au niveau local ?** Ce travail de prospective a été réalisé à la maille nationale. Les hypothèses qui ont été considérées ne seront peut-être pas pertinentes à une échelle locale. Cette question est importante pour les biocarburants liquides car l'implantation des sites de production devra tenir compte de l'approvisionnement en biomasse et de la localisation des anciennes raffineries dont certaines sont en reconversion. Ainsi, les zones industrielles avec une forte densité d'industries chimiques pourraient bénéficier de la proximité des futures unités de biocarburants. Les futures unités de production de biocarburants doivent en effet être considérées comme des bio-hubs énergétiques permettant la production de plusieurs produits : biocarburant routier, aérien, biogaz, bio-GPL, chimie biosourcée, électricité, chaleur…

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **SOeS**, *Bilan énergétique de la France pour 2015*, Datalab, 2016.

[2] **SDES**, *Chiffres clés des énergies renouvelables, Datalab*, 2020.

[3] https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/tableau-bord-biocarburants-2020.

[4] https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/tableau-bord-biocarburants-2019.

[5] **SDES**, *Bilan énergétique de la France pour 2019*, 2021.

[6] **CITEPA**, *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France* – Format Secten, 2020.

[7] **ADEME**, *Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France*, 2010.

[8] **Monia El Akkari *et al.***, *A meta-analysis of the greenhouse gas abatement of bioenergy factoring in land use changes*, Scientifics Reports, 2018.

[9] https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants.

[10] **ETIP Bioenergy**, *Bioenergy Fact SheetLast Update 2020-HVO*, 2020.

[11] https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants.

[12] https://www.connaissancedesenergies.org/le-developpement-des-biocarburants-en-4-questions-161014.

[13] **MINEFI**, *Feuille de route française pour le déploiement des biocarburants aéronautiques durables*, 2018.

[14] **Claude Sourisse**, *Biomasse et énergie : des ressources primaires aux produits énergétiques finaux*, 2018 (https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/).

[15] **ANCRE**, *Feuille de route pour le développement de filières biocarburants aéronautiques en France*, 2018.

[16] **IEA**, *Putting CO_2 to Use September 2019 Creating value from emissions*, Rapport, 2019, 86 pages.

[17] **Projet Kopernikus**, https://www.sunfire.de/en/news/detail/breakthrough-for-power-to-x-sunfire-puts-first-co-electrolysis-into-operation-and-starts-scaling.

[18] **ADEME – I Care & Consult**, *Benchmark des modèles d'impacts environnemental et économique issus du changement climatique*, et **ADEME et FranceAgriMer**, 2019. *Évaluation des impacts de 3 scénarios de développement des biocarburants pour la LTECV*, 2020.

[19] **ALCIMED, ADEME**, *Marchés actuels des produits biosourcés et évolutions à horizons 2020 et 2030*, 2015.

5. Hydrogène

1. Une filière émergente aux usages multiples
513

2. L'hydrogène bas carbone fait face à plusieurs défis
515

3. La filière hydrogène aura besoin d'arbitrages structurels de court terme
518

4. Des hypothèses structurantes qui conditionnent les équilibres « offre et demande d'hydrogène » dans chaque scénario
520

5. La place de l'hydrogène suspendue aux choix à venir sur la mobilité et la politique industrielle
524

6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures
533

7. D'autres facteurs, exogènes ou technologiques, pourront impacter le développement de l'hydrogène
536

8. Des évolutions possibles ainsi que d'autres hypothèses de scénarios possibles
537

9. Références bibliographiques
539

1. Une filière émergente aux usages multiples

1.1. Production et consommation actuelles d'hydrogène

Le marché mondial de l'hydrogène industriel s'élève actuellement à 70 millions de tonnes par an. Le marché français représente environ 780 000 tonnes par an selon les dernières données de France Hydrogène [1]. L'hydrogène est essentiellement utilisé comme matière ou intrant des procédés des secteurs du raffinage (désulfuration des carburants), des engrais (production d'ammoniac) et de la chimie. Il est actuellement produit à 98 % à partir de sources fossiles, pétrole et gaz naturel.

Une partie de cette production est en réalité « coproduite », puisque l'hydrogène est généré lors du traitement des coupes pétrolières en raffineries : ce secteur est ainsi en partie autosuffisant et réutilise cet hydrogène pour désulfurer les coupes. La sidérurgie est également productrice d'hydrogène coproduit, la gazéification du coke générant un gaz riche en hydrogène qui est valorisé *in situ*.

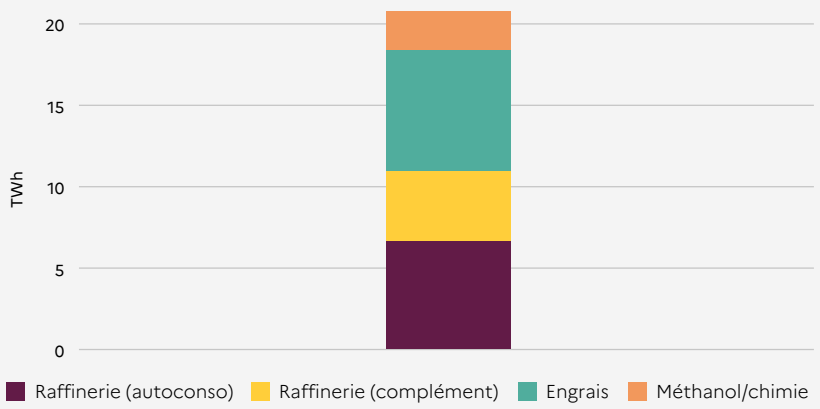
La production d'hydrogène dédiée dans l'industrie, par vaporeformage[1] de gaz naturel, s'élève ainsi en 2019 à 390 000 tonnes par an, complétées par 390 000 tonnes d'hydrogène coproduites en raffineries et cokeries. La part de l'hydrogène consommé substituable notamment par de l'H_2 produit par électrolyse est estimée à 420 kt [1].

L'hydrogène produit et consommé en France a crû pendant une trentaine d'années, du fait des réglementations plus strictes sur les teneurs en soufre des carburants, essentiellement gazole et FOD (fioul domestique), l'hydrogène étant utilisé pour désulfurer les coupes pétrolières. Récemment, le volume global tend à stagner, voire à baisser, du fait de la fermeture de raffineries, de cokeries et d'usines de production d'engrais sur le territoire national.

Dans le cadre de cet exercice prospectif, les usages directs de l'hydrogène coproduit comme combustible n'ont pas été considérés pour dimensionner la consommation en hydrogène[2]. Seuls sont conservés les usages actuels ou à venir adressables par de l'hydrogène bas carbone et les usages en autoconsommation dans les raffineries.

Ainsi en 2019, la production/consommation initiale considérée dans cet exercice[3] s'établit donc à 620 000 tonnes par an, soit environ 20 TWh[4] d'hydrogène *(Graphique 1)* :

Graphique 1 *Consommation d'hydrogène par usage en 2019 en France (calcul ADEME)*



1 Procédé de production de l'hydrogène basé sur la dissociation de molécules carbonées (méthane, etc.) en présence de vapeur d'eau et de chaleur.
2 En 2019, cette consommation correspondait à 130 000 tonnes d'hydrogène contenu dans le syngas en cokerie et 30 000 tonnes pour l'hydrogène coproduit à partir de procédés chimiques.
3 Pour tenir compte des évolutions des besoins en hydrogène selon les capacités de raffinage dans les différents scénarios.
4 Toutes les valeurs dans ce chapitre sont exprimées en TWh_{PCI}.

1.2. Les émissions de gaz à effet de serre liées à la production actuelle

La production d'hydrogène est émettrice de gaz à effet de serre. Le procédé de vaporeformage émettant 11,1 $kgCO_2/kgH_2$ [2], la production industrielle dédiée génère ainsi annuellement en France l'émission de 4,3 $MtCO_2$. Les émissions liées à la coproduction d'hydrogène sont plus difficiles à quantifier, elles supposeraient des règles d'allocations complexes entre produits. En première approche, en conservant le facteur d'émission du vaporeformage, les émissions de ces 390 000 tonnes coproduites s'élèveraient à 4,3 $MtCO_2$. L'ensemble de la production et de la consommation d'hydrogène industriel en France serait ainsi responsable de l'émission de 8,6 $MtCO_2$ par an.

L'un des enjeux à court terme est donc de réduire les émissions de GES liées à cette production dédiée par vaporeformage, en recourant à des modes de production d'hydrogène bas carbone ou renouvelable. Mais il est nécessaire de considérer l'évolution à moyen et long terme de ces secteurs historiquement consommateurs d'hydrogène (évolution à la baisse ou à la hausse de l'activité, réglementation, etc.) pour apprécier le caractère stratégique ou prioritaire de ces cibles pour le développement de l'hydrogène bas carbone ou renouvelable.

1.3. Les usages à venir

1.3.1. De nouveaux usages en tant qu'intrants matières dans l'industrie

L'hydrogène, s'il est bas carbone ou renouvelable, peut être utilisé comme intrant matière dans d'autres procédés industriels que ceux décrits précédemment. **Ainsi, on identifie les secteurs suivants pour lesquels l'hydrogène apparaît comme une solution, parmi d'autres, pour abattre les émissions de gaz à effet de serre (GES) :**

- **sidérurgie** : l'hydrogène peut être employé comme agent réducteur du minerai, que ce soit en injection dans les hauts fourneaux ou en utilisation directe (DRI, *Direct Reduction Iron*) pour la production de minerai préréduit (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*) ;

- **chimie du méthanol (MeOH) et autres intermédiaires** : plusieurs procédés permettent la synthèse du méthanol. Actuellement produit à partir de gaz naturel ou de pétrole, la combinaison d'hydrogène et de CO_2 est envisageable comme procédé alternatif (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*) ;

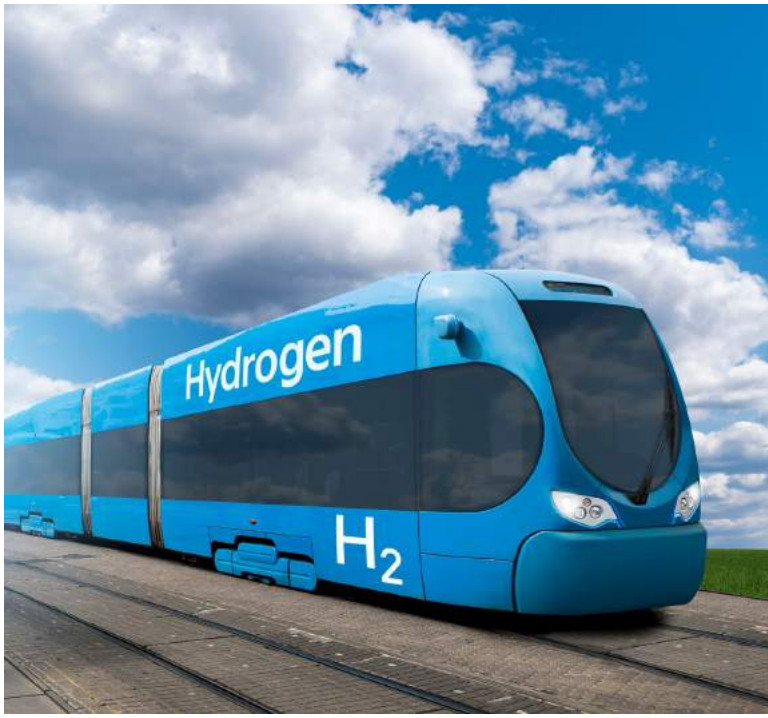
- **bioraffineries** : les procédés d'hydrogénation des huiles (HVO) nécessitent également un apport externe d'hydrogène (*cf.* chapitre *2.3.4. Carburants liquides*).

1.3.2. De nouveaux usages énergétiques diffus

Outre ces nouveaux usages industriels, **l'hydrogène bas carbone ou renouvelable peut également être utilisé comme vecteur énergétique pour décarboner les usages diffus** :

- dans les transports, qu'ils soient terrestres, fluviaux, maritimes ou aéronautiques (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*) :
  - de manière directe comme carburant ou combustible alimentant des véhicules équipés d'une pile à combustible ;
  - de manière indirecte *via* des carburants de synthèse liquides ou gazeux (e-fuels) composés d'hydrogène (*cf.* chapitres *2.3.4. Carburants liquides* et *2.3.1. Mix gaz*) ;

- dans les usages historiques raccordés aux réseaux de transport et de distribution de gaz (bâtiment, industrie, etc.) : l'hydrogène, combiné à du CO_2, permet de synthétiser du méthane qui peut être injecté dans les infrastructures et canalisations actuellement utilisées pour le gaz naturel (*cf.* chapitre *2.3.1. Mix gaz*).



2. L'hydrogène bas carbone fait face à plusieurs défis

2.1. La transition vers des moyens de production bas carbone

Pour abaisser l'empreinte carbone des consommations d'hydrogène actuelles et envisager de nouveaux usages compatibles avec les objectifs de neutralité carbone, il est nécessaire de développer de nouveaux procédés de production de l'hydrogène bas carbone ou renouvelable. **Ces développements doivent accroître leur maturité technologique et industrielle tout en confirmant leur potentiel d'abattement des émissions dans les usages finaux.**

2.1.1. Vaporeformage avec CCU/CCS

Les technologies de captage du CO_2 implémentées sur le procédé de vaporeformage de gaz naturel peuvent permettre d'abattre les émissions de GES de ce procédé historique. Le captage, et donc le niveau d'abattement, s'opère à deux niveaux [3] :

- **le flux de CO_2 issu du procédé de reformage** en lui-même (dissociation de la molécule de méthane) est le flux le plus simple à capter compte tenu de sa concentration élevée en CO_2. Le captage de ce flux permet d'abattre au maximum 56 % des émissions directes de GES de l'ensemble de l'installation, sans prendre en compte les émissions liées au transport, au stockage ou aux éventuelles réémissions ;

- **le flux de CO_2 issu de l'installation thermique** (chaudière), qui génère la vapeur d'eau utilisée dans le procédé de vaporeformage, est l'autre source majeure de GES de l'installation. Son captage est plus coûteux, le CO_2 étant plus dilué, comme pour toute installation de combustion à l'air. Le captage de ce second flux, en plus du premier flux du procédé, permet alors d'atteindre 90 % d'abattement des émissions sur l'ensemble de l'installation de vaporeformage.

Le surcoût en CAPEX (coûts d'investissements) d'une installation de vaporeformage équipée de captage de CO_2 est supérieur de 18 à 79 % [3]. Le coût de captage de la tonne de CO_2 varie ainsi de 47 à 70 EUR/tCO_2 selon le niveau de captage.

En aval du captage, on distingue deux voies pour le CO_2 :

- **le stockage géologique** : les faibles capacités de stockage géologique de CO_2 sur le territoire français conduisent à envisager cette solution hors des frontières, tout particulièrement en mer du Nord. Le conditionnement, le transport, le stockage du CO_2 et son monitoring dans le temps sont l'objet de démonstrations qui doivent préciser son efficacité et son coût [4] ;

- **la valorisation du CO_2 comme matière**, le CO_2 pouvant être utilisé directement ou recombiné pour une production de produits chimiques ou énergétiques tels le méthanol ou les e-fuels. Le bilan GES final sera bien sûr dépendant de l'efficacité globale de cette boucle CO_2 et des émissions nettes émises ou réémises à l'atmosphère (*cf.* l'avis d'expert de l'ADEME sur le CCU, paru en septembre 2021).

2.1.2. Électrolyse

Les technologies d'électrolyse représentent la technologie pivot qui permettra de produire de l'hydrogène à partir d'eau et d'électricité, à la demande et à différentes échelles, pour des quantités d'énergie allant du kilowatt.heure électrique à plusieurs centaines de mégawatt.heures électriques. Le poids carbone du kilo d'H_2 et donc son potentiel de décarbonation des usages visés dépendent directement du procédé amont utilisé pour fabriquer l'électricité nécessaire *(Tableau 1)* :

Tableau 1 Facteurs d'émission de la production d'hydrogène par électrolyse en fonction de la source d'électricité [2]

Ressource électrique	Facteur d'émission lié à la production d'hydrogène par électrolyse, $kgCO_2/kgH_2$
Mix électrique FR 2023	2,77
Mix électrique EU 2023	19,8
Éolien	0,7
Photovoltaïque	2,58
Hydraulique	0,45

Ainsi, l'hydrogène bas carbone, produit à partir du mix électricité français, a un poids carbone 75 % inférieur au poids carbone de l'hydrogène produit par vaporeformage de gaz naturel (11,1 kgCO_2/kgH_2). Pour l'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable, ce poids est 77 à 95 % inférieur au procédé historique.

En 2020, les deux principales technologies, l'électrolyse alcaline et, dans une moindre mesure, l'électrolyse PEM (*Proton Exchange Membrane* ou à Membrane Échangeuse de Proton), amorcent leur phase d'industrialisation, même si les capacités totales installées en Europe restent encore faibles, de l'ordre de 55 MW [5].

2.1.3. Pyrogazéification de biomasse/déchets

Les technologies de pyrogazéification représentent un autre champ de technologies de production d'hydrogène, à partir de combustibles biomasses solides par exemple, mais aussi de déchets. La décomposition de ces combustibles sous l'effet de la chaleur produit (sous certaines conditions de température et de pression) un gaz de synthèse dont on peut extraire la fraction hydrogène. Des démonstrateurs sont en cours d'expérimentation et permettront de valider ou infirmer le potentiel de cette voie. Il est cependant à noter la grande variabilité des procédés et des types de biomasses mobilisables, ce qui limite la généralisation rapide de cette technologie. Outre la durabilité de la ressource biomasse utilisée, la valorisation des coproduits associés (résidus solides, gaz résiduel, chaleur cogénérée) est essentielle à la rentabilité de telles installations.

2.2. Électrolyse : industrialisation, baisse des coûts et compétitivité

Si les technologies d'électrolyse sont déjà connues et déployées à l'échelle de centaines de MW dans le domaine de la production du chlore et de la soude (électrolyse chlore-alcali), celles dédiées à la production d'hydrogène sont en cours de développement et d'industrialisation. Les technologies alcaline et PEM présentent chacune leurs caractéristiques propres (efficacité, encombrement, temps de réaction et plage de variation, etc.) mais doivent encore progresser :

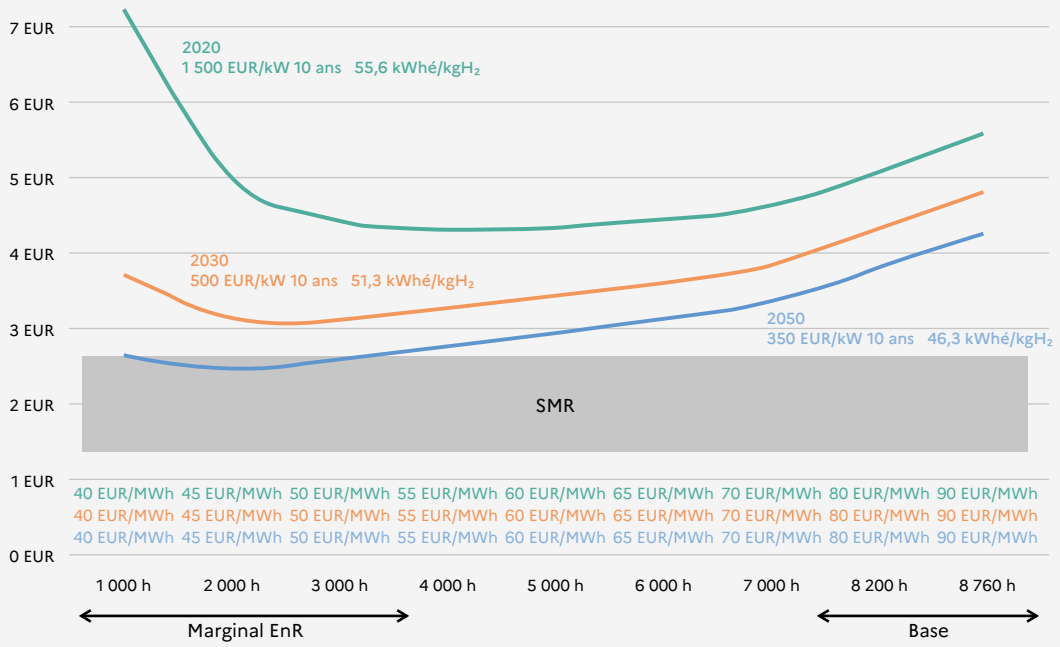
- l'un des enjeux pour ces technologies est de **poursuivre et d'amplifier la baisse des coûts d'investissements**, aujourd'hui autour de 1 500 EUR/kW, pour atteindre 500 EUR/kW en 2030 et 350 EUR/kW à terme en 2050. Cette baisse de coût s'opérera principalement par l'industrialisation permise par l'effet volume lié à la demande croissante pour ces équipements (plusieurs GW/an) ;
- **l'accroissement de la durée de vie des stacks** (empilements des cellules élémentaires d'électrolyse) est également un enjeu majeur. Il permet de réduire les coûts d'investissement liés à leur remplacement sur la durée de vie des installations. Un accroissement de 50 % de la durée de vie actuelle des stacks d'électrolyse, pour passer de 10 à 15 ans de longévité, est envisageable pour ces technologies ;
- **l'augmentation du rendement énergétique**, typiquement de 56 kWhé/kgH_2 aujourd'hui, à 46 kWhé/kgH_2 en 2050, est également un facteur clé pour atteindre un coût de production d'hydrogène optimisé [6].

Le coût de production de l'hydrogène sera constitué à terme majoritairement du prix de l'électricité auquel aura accès l'électrolyseur. Ce prix variera en réalité en fonction du taux de charge visé sur l'année (nombre d'heures). Le *Graphique 2* présente l'évolution du coût de production du fait de la baisse attendue des coûts de l'électrolyse et de l'amélioration de ses performances, en fonction de ce taux de charge, qui influe sur le prix de l'électricité mais également sur l'amortissement des CAPEX : un taux de charge plus élevé permet, en produisant plus d'hydrogène, d'amortir plus rapidement les investissements, mais il nécessite d'acheter l'électricité à des périodes où son prix sera moins favorable *(Graphique 2)*.

Le coût de production d'hydrogène par vaporeformage de gaz naturel (SMR) se situe actuellement dans une fourchette allant de 1,5 à 2,5 EUR/kgH_2. Sans modification de la fiscalité carbone, sans soutien direct aux investissements et au fonctionnement et sans prendre en compte les évolutions du mix électrique, l'électrolyse n'atteint ces niveaux de coût de production qu'en 2050, pour des taux de charge de 2 000 à 3 000 h. **La compétitivité de l'hydrogène produit par électrolyse, par rapport à l'hydrogène carboné, demeure donc un enjeu majeur pour ce secteur**. D'autres éléments sont cependant à prendre en compte pour assurer la compétitivité de la solution électrolyse :

- **pour les usages diffus**, la production décentralisée d'hydrogène permet de s'affranchir de tout ou partie des coûts de livraison non pris en compte dans le *Graphique 2* ;
- **pour les usages industriels** pour lesquels des moyens de stockage ou de back up d'approvisionnement pourraient être aussi à considérer afin de sécuriser les capacités de production et éviter toute interruption.

Graphique 2 Coûts de production de l'hydrogène (en EUR/kg d'H_2) selon le taux de charge annuel de l'électrolyseur pour différentes hypothèses de CAPEX (HT, TURPE inclus), comparé au coût de production à partir de gaz naturel (SMR)[5]



2.3. Conditions de diffusion

Si aujourd'hui l'hydrogène est employé exclusivement en milieu industriel, de manière confinée et peu visible pour le grand public, la diversification de ses usages passera par une démocratisation et une diffusion des technologies mises en œuvre. Ce sera particulièrement le cas pour l'hydrogène employé dans le domaine du transport et de la mobilité pour lequel les réglementations, les normes mais aussi les retours d'expériences de plus de 10 ans permettent d'assurer la fiabilité des équipements de production ou de distribution (stations-service). La maîtrise des risques et son maintien dans le temps (vieillissement des équipements, habitudes, etc.) sont ainsi une condition forte de déploiement de l'hydrogène.

Au-delà de l'acceptabilité liée aux risques des technologies, celle des impacts associés à sa production est également en question. **La production d'hydrogène suppose la consommation de ressources, tout particulièrement d'électricité et d'eau dans le cas de l'électrolyse, et renvoie donc aux questions de société sur ces sujets** : développement des parcs éoliens et occupation de l'espace, développement et/ou maintien du parc de centrales nucléaires et gestion de déchets radioactifs ; tension sur la ressource hydrique dans certaines zones où la concurrence pourra être accrue en période estivale (irrigation agricole, tourisme).

Concernant ce dernier point, les ressources en eau mobilisées pour les procédés d'électrolyse ne semblent pas relever d'une problématique majeure. La production d'un kilo d'hydrogène par un électrolyseur consomme 10 à 20 litres d'eau, soit une consommation totale annuelle de 30 à 60 Mm³ d'eau pour 100 TWh d'hydrogène, volume de consommation totale d'hydrogène pour les scénarios les plus favorables. Soit une consommation rapportée par habitant de 0,45 à 0,9 m³, ce qui reste relativement limité au regard de la consommation d'eau potable qui s'élève à 53 m³ par an et par habitant. Cela n'exclut pas, comme évoqué précédemment, des tensions locales sur la ressource en eau, selon le contexte d'usages concurrents, de population, de gestion des stocks, etc. Les conditions de diffusion de cette technologie devront donc être considérées à l'avenir.

5 Les valeurs du prix de l'électricité sont extrapolées de l'étude [7] et par simplification considérées égales pour 2020, 2030 et 2050. Les valeurs définies dans cette modélisation sont proches, bien que légèrement supérieures, de celles détaillées dans [8].

3. La filière hydrogène aura besoin d'arbitrages structurels de court terme

La modélisation prospective suppose de formaliser des hypothèses qui sont structurantes. Concernant l'hydrogène, il apparaît que les arbitrages relatifs à l'emploi de l'hydrogène selon les usages sont déterminants (*cf. section 3.1*). Le choix des technologies et des ressources à mobiliser interagissent par ailleurs fortement avec l'ensemble du système modélisé (*cf. section 3.2*). Le recours à l'importation d'hydrogène est également une donnée d'entrée fondamentale, en orientant les choix d'infrastructures à investir sur le territoire national (*cf. section 3.3*).

3.1. Les divers usages de l'hydrogène

La panoplie des usages possibles de l'hydrogène, en tant que matière, produit intermédiaire ou vecteur énergétique pour des usages finaux, s'avère très vaste, qu'il s'agisse de l'industrie, du bâtiment, des transports ou des réseaux. **Le recours à l'hydrogène est en fait, pour chaque secteur ou sous-secteur, à considérer au regard des autres technologies disponibles pour abattre les émissions et réduire l'empreinte carbone.** L'existence ou la coexistence de technologies pour un secteur donné peut conduire à une situation de concurrence ou bien de complémentarité.

Dans le domaine des transports terrestres par exemple (mobilité individuelle et collective des particuliers, différents segments du transport de marchandises du 3,5 t au 44 t, transport ferroviaire pour les personnes et le fret), **le recours au carburant hydrogène est en compétition ou en complémentarité avec les solutions batteries, les biocarburants liquides, le gaz et les carburants de synthèse (e-fuels)**. Outre la question du service rendu à l'usager et des externalités qui ne sont pas identiques, le choix est complexe et plurifactoriel : évolution intrinsèque des technologies et de leurs performances, existences d'infrastructures de recharge ou d'alimentation des véhicules ou programmes de déploiements associés, ressources disponibles sur les territoires, évolution des réglementations incitatives ou coercitives sur les pollutions locales, portages politique et industriel des technologies.

Dans l'industrie, certains secteurs seront amenés à faire des choix de process ou de modèles qui conditionneront l'opportunité ou non de recourir à l'hydrogène pour décarboner leur activité. Ainsi en sidérurgie, le recours aux procédés à arc électrique et à une plus grande part de matières recyclées peut conduire à une pénétration importante d'hydrogène dans la préparation de produits préréduits (produits semi-finis) *via* des procédés DRI à déployer. L'implantation de ce type d'usines sur le territoire peut s'envisager de manière plus décentralisée que le modèle actuel des hauts fourneaux. Ceux-ci peuvent également recourir à l'hydrogène par injection dans les tuyères, un procédé qui peut aussi fonctionner avec du gaz naturel avec CCS, au gaz décarboné ou à d'autres combustibles tels les combustibles solides de récupération (CSR) avec lesquels l'hydrogène sera en compétition. Cette compétition est également valable dans d'autres domaines industriels comme la chimie du méthanol, utilisé à des fins énergétiques ou matière (précurseur des plastiques et autres dérivés). L'usage du méthanol est lui-même soumis à des schémas évolutifs distincts selon les réglementations et les choix et arbitrages des filières aval.

L'exercice prospectif s'avère donc relativement complexe pour estimer les volumes de la demande d'hydrogène futurs sur l'ensemble des segments d'usage. Cette analyse du contexte propre à chaque secteur, qui multiplie les incertitudes, est néanmoins nécessaire et doit être explicitée pour fixer les scénarios de demande.

3.2. Technologies et ressources mobilisées pour produire l'hydrogène

Plusieurs technologies sont disponibles pour produire de l'hydrogène bas carbone ou renouvelable. Sur un territoire donné, local ou national, certains investissements à réaliser, à conserver ou convertir, devront être exclusifs afin d'éviter des concurrences. Parmi les critères qui vont structurer ces choix de technologies et d'infrastructures associées, on peut citer :

- **le type de ressources primaires à mobiliser**, parmi lesquelles des ressources fossiles (vaporeformage de gaz naturel avec CCS), fissiles (électrolyse d'électricité nucléaire) ou renouvelables (électrolyse d'électricité renouvelable, pyrogazéification de biomasse). Outre le contenu carbone de ces ressources, des problématiques de coûts, de gisements, de ressources (uranium), de surfaces disponibles (pour les renouvelables notamment), de concurrences d'usages (pour la biomasse en particulier) entrent en considération dans ces choix. La question des ressources en eau peut par ailleurs s'avérer contraignante pour le recours à la technologie d'électrolyse dans certaines zones ;

- **l'état des réseaux et infrastructures disponibles ou à développer** : la disponibilité des réseaux électriques sur lesquels l'électrolyse peut se connecter, la présence de canalisations hydrogène déjà existantes ou de gaz naturel pouvant être reconverties pour accueillir de l'hydrogène pur, la disponibilité de stockages géologiques et de cavités salines en particulier offrant la possibilité d'un stockage intersaisonnier ainsi que l'adéquation entre offre et demande d'hydrogène sur un territoire vaste, la proximité d'infrastructures de transport de CO_2 mutualisées avec d'autres sources rendant accessible à coût marginal le CCS sur une unité de vaporeformage, etc.

Ainsi, selon les principes guidant un scénario, l'investissement dans telle ou telle technologie pourra être privilégié pour répondre à la demande d'hydrogène identifiée dans les usages.

3.3. Recours ou non à l'import d'hydrogène

La demande d'hydrogène peut être satisfaite par une production nationale et/ou dans le cadre d'un schéma d'importation. Les échanges mondiaux d'énergie devraient probablement s'étendre à l'hydrogène, sous cette forme ou *via* d'autres vecteurs facilitant son acheminement sur de longues distances entre continents (ammoniac, liquide organique porteur d'hydrogène [LOHC], etc.) [9]. Ainsi certaines stratégies comme celle de l'UE et de l'Allemagne envisagent clairement de recourir à des coopérations pour importer de l'hydrogène depuis des pays où il pourrait être produit de façon renouvelable ou décarbonée, massivement et à bas coût (notamment en raison de conditions favorables au développement des énergies renouvelables), d'Ukraine, du Maghreb, du Moyen-Orient ou d'Amérique du Sud, pour assurer un approvisionnement face à la croissance attendue de la demande domestique.

La recherche d'indépendance énergétique ou la volonté de nouer des alliances géopolitiques avec des pays tiers apparaissent ainsi déterminantes dans la construction d'infrastructures :

- l'importation suppose le développement de pipelines entre pays frontaliers, la réalisation de capacités d'accueil dans certains ports pour ensuite acheminer l'hydrogène vers les zones consommatrices, par canalisations ou camions. Ce choix peut être opéré dans une logique de compétitivité, afin de ne pas contraindre les prix en bénéficiant de gisements d'hydrogène à coûts moindres ;

- à l'inverse, la production d'hydrogène sur le territoire peut conduire à localiser ces moyens de manière centralisée ou plus répartie, en regard de la répartition des usages, qu'ils soient massifs ou plus diffus. La valorisation des ressources nationales et la maîtrise de la chaîne d'approvisionnement peuvent motiver ce choix.

Ainsi, la possibilité du recours à l'importation d'hydrogène est l'une des hypothèses structurantes majeures dans la définition d'un système énergétique intégrant ce vecteur dans les usages.

4. Des hypothèses structurantes qui conditionnent les équilibres « offre et demande d'hydrogène » dans chaque scénario

4.1. Les arbitrages entre les usages de l'hydrogène

4.1.1. Usages considérés

A priori, un large panel d'usages potentiels est considéré comme envisageable sur l'ensemble des secteurs finaux et correspond à ceux listés aux *sections 1.1* et *1.3* :

- usages matière actuels dans l'industrie : raffinage pour la désulfuration des carburants fossiles, production d'ammoniac pour les engrais ;
- usages matière futurs dans l'industrie : sidérurgie pour la production d'acier, production de méthanol et dérivés pour la chimie, bioraffinage correspondant à l'hydrogénation des huiles végétales ;
- usages énergétiques spécifiques aux transports : usages directs d'hydrogène dans les véhicules, *power-to-liquid* (P-t-L) recouvrant les carburants de synthèse liquides ou e-fuels. Tous les segments sont *a priori* concernés :
  - véhicules terrestres routiers (véhicules légers, bus et autocars, camions) et non routiers (trains pour le transport de passagers et de marchandises) ;
  - bateaux et navires pour les transports fluvial et maritime ;
  - avions ;
- usages énergétiques gaz : *power-to-gas* (P-t-G) correspondant à la production de méthane de synthèse par méthanation et injection dans les infrastructures gazières distribuant des secteurs variés (industrie, bâtiments, transports, etc.). Dans nos scénarios, cette technologie est envisagée uniquement en lien avec le déploiement de la méthanisation afin de profiter des synergies comme la valorisation du CO_2 biogénique coproduit par le procédé de méthanisation.

Comme exposé précédemment dans la *section 3.1*, le recours à l'hydrogène est spécifique à chaque usage en fonction du contexte propre à chaque secteur et selon chaque scénario étudié. **Ainsi, le lecteur est invité à se reporter aux différents chapitres spécifiques, qui explicitent les choix de recourir ou non aux solutions hydrogène** : pour les usages industriels (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*), pour les usages directs dans les transports (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), pour les usages sous forme *power-to-liquid* (*cf.* chapitre *2.3.4. Carburants liquides*), pour les usages du *power-to-gas* (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*).

4.1.2. Usages non considérés

Pour rationaliser le champ des possibles et le nombre de scénarios de cet exercice prospectif, le choix a été fait d'écarter certains usages de l'hydrogène qui apparaissent, à date, comme moins probables. Cela n'exclut pas que ces usages puissent émerger ou se généraliser dans certaines zones géographiques en dehors du territoire national. Il s'agit ici d'un choix d'hypothèses pour le contexte national uniquement.

Le premier usage qui n'a pas été considéré, quel que soit le scénario, **est l'usage de l'hydrogène dans les bâtiments**. En effet, d'autres solutions reposant sur les vecteurs électriques et gaz sont actuellement disponibles : elles sont techniquement et économiquement matures et présentent un bon rendement énergétique global. La décarbonation de ces usages pourra passer en priorité par la décarbonation de ces vecteurs électricité et gaz, sans nécessairement recourir à la généralisation d'un réseau d'hydrogène maillé qui alimenterait l'ensemble des bâtiments du résidentiel et du tertiaire.

Le second usage de l'hydrogène écarté est **l'injection partielle d'hydrogène dans les réseaux de gaz**. C'est certes une solution permettant de décarboner le contenu des infrastructures gazières en remplaçant le gaz naturel par de l'hydrogène. Cependant cette solution reste limitée à 20 % en volume, soit 7 % en énergie du contenu des réseaux, ce qui n'en fait pas

une solution de décarbonation large en ligne avec la neutralité carbone. De plus, les incertitudes et difficultés techniques sur la compatibilité du mélange, les coûts économiques de l'adaptation des équipements notamment pour les usagers (industries, transports, réseaux gaz, bâtiments) rendent cette option risquée. *A contrario*, la synthèse de méthane, reposant sur la combinaison d'hydrogène et de CO_2, a été privilégiée pour le couplage hydrogène et réseaux de gaz. Cette option ne souffre pas de limitation technique à l'injection et ne nécessite aucune adaptation particulière des équipements et matériels, que ce soit sur le réseau ou chez les usagers du réseau de gaz.

Les usages thermiques directs en industrie et notamment **la combustion de l'hydrogène dans les fours industriels** n'ont pas été considérés dans le périmètre des scénarios. De nombreux tests de combustion d'hydrogène doivent être réalisés pour plusieurs secteurs : verres, tuiles, distillation, séchage, sidérurgie. À date, le retour d'expérience sur la combustion à haut taux d'hydrogène n'est pas suffisant pour pouvoir apprécier son intérêt, sa fiabilité et les conditions à respecter pour lever les éventuels verrous (émissions additionnelles de NO_x, détérioration des réfractaires, conséquences sur les produits manufacturés). Si cette option de décarbonation reste envisageable comme moyen de conversion d'usages non électrifiables directement, elle a été écartée à défaut de connaissances spécifiques.

La **généralisation des véhicules légers électriques hydrogène pour les particuliers** n'a été envisagée dans aucun scénario :

- l'hypothèse est faite que l'industrialisation en cours des gammes de véhicules électriques et l'augmentation croissante des performances des batteries permettront de couvrir une grande part des besoins de mobilité des particuliers, limitant le positionnement de l'offre de véhicules électriques hydrogène sur un segment minoritaire (haut de gamme, véhicules particuliers les plus lourds) ;
- sur un plan énergétique, ce choix s'appuie également sur un principe d'efficacité d'utilisation des ressources électriques : le rendement de la chaîne de stockage par batterie étant 2 à 2,5 fois celui de la chaîne hydrogène, la technologie batterie est préférée lorsque cela est possible. Ce rapport de rendement se traduit également dans le coût d'exploitation des véhicules, la recharge électrique sera plus avantageuse que le plein d'hydrogène.

Cependant, les véhicules légers hydrogène ne sont pas totalement écartés et, dans certains scénarios comprenant un fort déploiement de l'hydrogène pour la mobilité lourde, une part de véhicules pour particuliers à hydrogène a été considérée, ceux-ci pouvant bénéficier du réseau de stations se déployant par ailleurs.

Enfin, le dernier usage de l'hydrogène écarté est **l'équilibrage des réseaux électriques *via* la solution de *power-to-hydrogen-to-power***, c'est-à-dire le fait de recourir au stockage d'hydrogène dans des cavités pour produire de l'électricité à la demande du réseau électrique avec des piles à combustible ou des turbines hydrogène. Cette chaîne d'équilibrage n'a été considérée dans aucun scénario car une solution concurrente assure cette fonction, en particulier le recours à des moyens thermiques de production d'électricité utilisant le gaz, que ce gaz soit produit par *power-to-methane* (installations associées systématiquement aux installations de méthanisation pour utiliser le CO_2 produit par ces dernières) ou qu'il soit décarboné d'une autre manière (S1, S2 et S3 ; méthanisation, pyrogazéification entre autres), ou associé à l'émergence de CCS dans S4 (pas de *power-to-methane* dans S4). Ainsi, cet équilibrage du réseau électrique repose, dans chacun de nos scénarios, sur le vecteur gaz et non sur une production et un stockage dédiés d'hydrogène pour assurer cette fonction. Au final, **l'équilibrage des réseaux électriques *via* des centrales thermiques au gaz** produit une électricité dont le caractère renouvelable dépend du taux de gaz renouvelable dans le réseau, le taux de gaz renouvelable variant en fonction du scénario considéré.

4.2. Les arbitrages relatifs aux moyens de production d'hydrogène

4.2.1. Moyens de production considérés

Dans les scénarios prospectifs, deux familles de technologies de production sont intégrées aux modèles et entrent en compétition : le vaporeformage et l'électrolyse.

Le **vaporeformage de gaz** est la technologie historique et représente un actif de production disponible dès 2020. Dans les chroniques d'investissement, et pour être en accord avec l'objectif de neutralité carbone en 2050, le renouvellement (ou l'extension) de ce parc de production est conditionné soit au développement du CCS, soit à une évolution des réseaux vers un gaz fortement décarboné.

Concernant l'électrolyse, **les technologies basse température PEM et alcaline** ont été considérées. Ces deux technologies disposent actuellement d'une maturité légèrement différente, la technologie alcaline étant à une phase d'industrialisation plus avancée. Cependant on peut observer des évolutions et projections concernant les coûts, les rendements et les durées de vie qui convergent d'ici 2030 et 2050. Par ailleurs, ces deux technologies devraient bénéficier dans la décennie à venir d'investissements dans des usines capables de produire des électrolyseurs

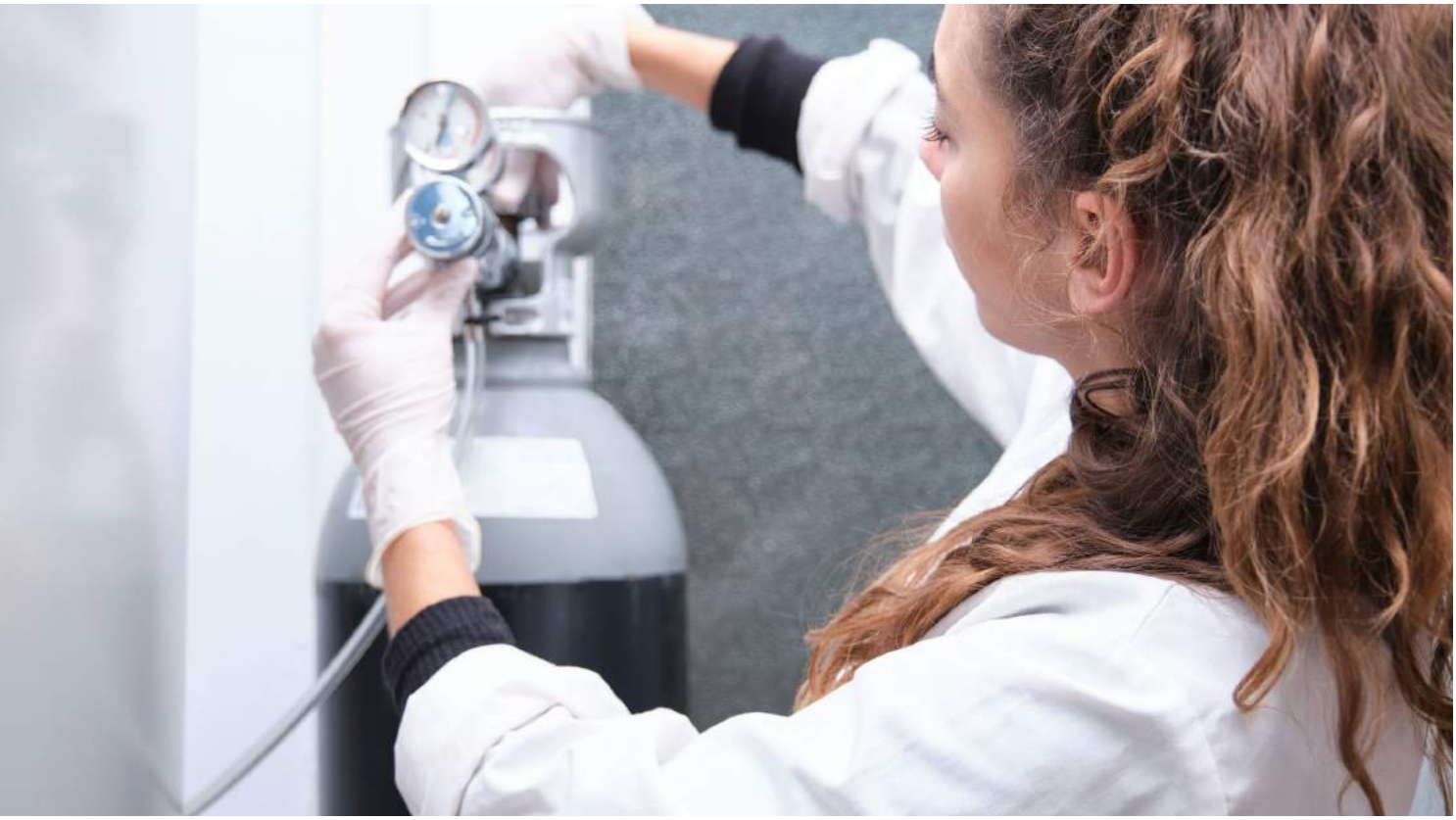
pour une puissance cumulée de l'ordre du GW par an et donc bénéficier d'un même effet d'industrialisation. Aussi, par simplification, ces deux technologies ont été rassemblées sous le même terme générique d'électrolyse sans les distinguer.

4.2.2. Moyens de production non considérés

Dans cet exercice prospectif, certains moyens de production ou sources d'hydrogène ont été écartés du périmètre d'analyse. Non que ces moyens ou sources présentent un faible intérêt ou potentiel pour contribuer à la décarbonation, mais il s'agit d'une approche volontairement prudente, compte tenu de leur maturité et en l'absence de retour d'expérience suffisant.

L'électrolyse haute température n'a pas été considérée dans cet exercice. Cette technologie, fonctionnant à plus de 700 °C et constituée des composants céramiques, repose sur l'électrolyse de la vapeur d'eau. Cela permet d'améliorer le rendement de conversion de l'électricité en hydrogène lorsque l'on peut bénéficier de chaleur haute température pour vaporiser l'eau. Cette technologie est à ce jour à un niveau de développement TRL 5-6 et ne dispose donc pas encore d'une maturité technique et industrielle suffisante pour confirmer ses performances, dont son rendement. Outre cette question du rendement, les modes de fonctionnement doivent aussi être explorés : le niveau de température et les limites de cyclage (arrêts/démarrages) liés aux céramiques positionnent cette technologie comme fonctionnant plutôt en base, ce qui conditionne le profil de consommation électrique et donc son coût d'exploitation. Pour obtenir des hypothèses économiques fiables, il est par ailleurs nécessaire d'apprécier la durée de vie des stacks, ce qui est difficile d'anticiper aujourd'hui. Les futurs démonstrateurs permettront de réduire les incertitudes attachées à cette technologie d'électrolyse innovante.

Le procédé de **pyrogazéification de la biomasse** permet la composition thermique de la biomasse et la production d'un gaz à partir duquel l'hydrogène peut être extrait. Cette technologie est à ce jour à un niveau de développement TRL 6-8. Mais si des procédés sont en cours de démonstration avancée à échelle représentative, il est cependant difficile de généraliser sur le niveau de maturité pour l'ensemble de cette famille technologique : chaque procédé est en réalité propre au constructeur et les résultats obtenus dépendent des intrants utilisés qui peuvent être de nature très variée. Par ailleurs, comme pour tous les procédés recourant à la biomasse, la question de la disponibilité de la ressource compte tenu des concurrences d'usage est une question majeure. Ainsi, par prudence sur la maturité technologique et la complexité relative aux approvisionnements, cette filière n'a pas été intégrée à l'exercice prospectif comme moyen de production d'hydrogène à grande échelle.



La décomposition de gaz par plasma, qui produit hydrogène et carbone sous forme solide, est une technologie qui fait l'objet de développements sur la base du méthane, mais qui n'a pas été prise en compte en l'absence de connaissances précises sur sa maturité comme ses caractéristiques techniques. La valorisation technique et économique du carbone formé nécessite d'être précisée. Par ailleurs, une quantification des impacts sur la base de cycle de vie permettrait de mieux apprécier l'intérêt de cette technologie en terme matière, énergie et contribution à l'effet de serre.

Outre ces moyens de production, deux sources d'hydrogène auraient pu être intégrées au modèle :

- **l'hydrogène coproduit par les procédés d'électrolyse de saumure** exploités dans l'industrie des produits chlorés et fluorés. Les volumes d'hydrogène sont directement liés aux productibles halogénés mais restent relativement limités, de l'ordre de 50 kt/an. La valorisation de cet hydrogène reste cependant intéressante pour des usages locaux ;

- **les sources d'hydrogène naturel**, émanant du sol, font l'objet de recherches géologiques. Les mécanismes de formation de cet hydrogène sont encore à identifier et à comprendre, ainsi que les phénomènes de migration dans les couches du sous-sol et les conditions favorables à son accumulation [10]. En France, des émanations d'hydrogène naturel ont été détectées dans les zones montagneuses (Alpes et Pyrénées) mais aucune campagne d'évaluation des gisements ni de cartographie n'ont débuté. Le fait de considérer cet hydrogène comme une source de production (flux continu qui se régénère) ou comme une ressource à exploiter (stock souterrain fini à l'image du pétrole et du gaz naturel) reste une question ouverte. Ces incertitudes ont conduit à écarter l'exploitation de cette source dans les scénarios.

4.3. Transport d'hydrogène par pipe et importation

Le développement d'un maillage sur le territoire de pipes ou de canalisations hydrogène n'a pas été considéré comme une donnée d'entrée *a priori*. Le recours à ces infrastructures est plutôt envisagé comme une conséquence qui se justifie lorsque des consommateurs industriels massifs d'hydrogène apparaissaient dans une ou des zones industrielles. C'est bien l'identification géographique de ces consommateurs massifs et la quantification des besoins qui nécessitent d'acheminer des volumes importants d'hydrogène à partir des zones de production. Les canalisations permettent également dans ce cas d'assurer le rôle de stockage intermédiaire entre une production variable et des profils de consommation plutôt constants.

Dans nos scénarios, comme il sera précisé plus loin, la nécessité d'un maillage national de réseaux hydrogène apparaît dans S3 uniquement : des canalisations de gaz naturel sont reconverties pour transporter de l'hydrogène, de nouveaux pipes dédiés sont créés, le stockage d'hydrogène en cavité saline se multiplie. Dans ce scénario, ces infrastructures permettent de valoriser une production nationale d'hydrogène mais également d'importer de l'hydrogène provenant du sud de l'Europe, importation nécessaire pour couvrir la demande sur ce scénario. Les vecteurs chimiques de transport de l'hydrogène à savoir l'ammoniac et les LOHC n'ont pas été considérés, l'importation d'hydrogène gazeux transporté par pipes depuis les pays voisins ayant été jugée suffisante.

4.4. Bouclage avec l'électricité et le gaz

La production d'hydrogène consomme, selon le procédé choisi, soit du gaz soit de l'électricité. L'hydrogène permet par ailleurs de produire du gaz de synthèse, dont l'objectif est double : contribuer à décarboner les usages finaux du gaz tout en diminuant les importations et permettre de stocker puis de produire de l'électricité par des moyens thermiques (turbines, cycles combinés) lorsque c'est nécessaire pour équilibrer l'offre et la demande sur les réseaux électriques dans une logique de *power-to-gas-to-power* et de stockage intersaisonnier d'énergie.

Ces interactions bidirectionnelles (électricité <-> hydrogène <-> gaz) entre ces trois vecteurs ont nécessité de multiples rebouclages afin de définir les moyens de production d'hydrogène à mettre en œuvre, leurs capacités et leur mode de fonctionnement. **Au-delà de la question des usages, c'est une analyse systémique des réseaux et des vecteurs énergétiques électricité, hydrogène et gaz qui a été menée tout au long de cet exercice.** Celui-ci tient compte des gisements disponibles ainsi que du contenu carbone de ces vecteurs pour atteindre *in fine* la neutralité carbone des scénarios.

5. La place de l'hydrogène suspendue aux choix à venir sur la mobilité et la politique industrielle

Ce chapitre présente les principaux résultats issus de la modélisation concernant l'hydrogène, en se focalisant sur les volumes d'hydrogène consommés par usage et les moyens de production installés. Pour une lecture et une compréhension approfondie des résultats, le lecteur est invité à se reporter aux chapitres correspondant aux secteurs d'usage, qui précisent et justifient le recours à l'hydrogène en fonction de leur contexte propre.

5.1. Scénario tendanciel : une production d'hydrogène par électrolyse limitée

Ce scénario n'offre pas une place importante à l'hydrogène, de l'ordre de 25 TWh en 2050 (hors autoconsommation dans le raffinage). L'hydrogène produit par électrolyse y représente 49 % de la production avec 12,4 TWh. Ce sont essentiellement les secteurs historiques qui tirent encore la consommation : la production de méthanol et d'engrais à partir de reformage de gaz naturel et le raffinage sur la base d'électrolyse *(Graphique 3)*. On peut également noter que la production de carburants de synthèse liquides, en complément des usages directs de l'hydrogène dans les transports, nécessite le déploiement d'une production par électrolyse.

Ainsi, sur ce scénario, on observe une certaine diversité des usages, à la fois centralisés et décentralisés, ainsi qu'une mixité des moyens de production, avec un recours partagé entre gaz et électricité pour produire l'hydrogène.

Cependant les volumes d'hydrogène produits par électrolyse restent modestes, en comparaison des scénarios visant la neutralité carbone *(Tableau 2)*. Il en résulte un déploiement d'électrolyseurs très limité (2,4 GW en 2050) et une industrie de production de ces équipements proche des capacités industrielles actuelles (0,2 GW/an).

Graphique 3 Consommation d'hydrogène par secteur en 2019, 2030 et 2050 en TWh, dans le scénario TEND

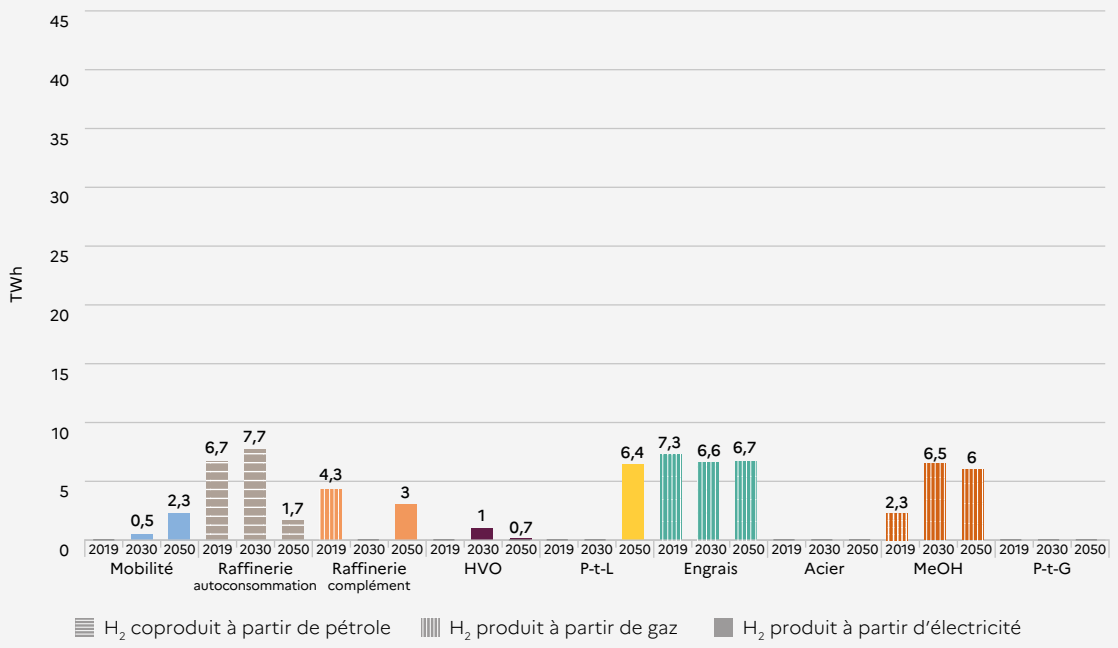


Tableau 2 Synthèse du scénario tendanciel

	2019	2030	2050
Consommation d'H_2 en TWh	20,7	22,2	26,7
Consommation d'H_2 en TWh (hors autoconsommation raffinage)	14	14,5	25,1
Part électricité/gaz pour la production d'H_2 (hors autoconsommation raffinage)	0 %/100 %	10 %/90 %	49 %/51 %
Consommation énergétique : • Électricité en TWh • Gaz en TWh	 0 20	 2,2 18,6	 17,4 18,2
Capacités d'électrolyse installées en France en GW	0	0,3	2,4
Capacités de production d'électrolyseur nécessaires pour alimenter le marché intérieur GW/an	0	0,2	0,2

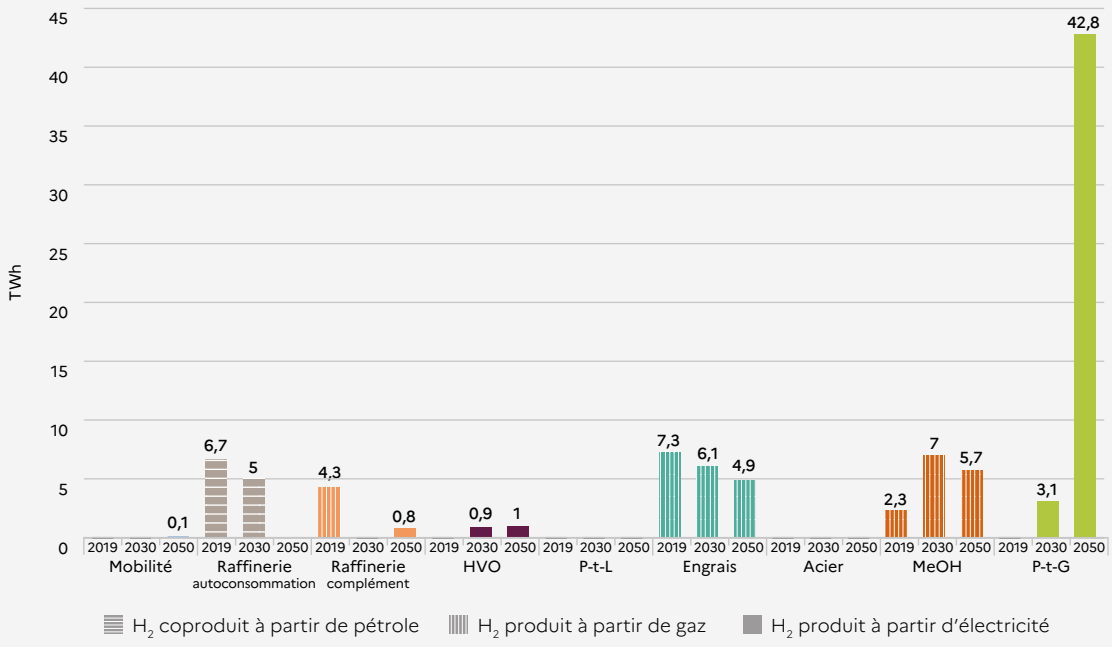
5.2. Scénario 1 : l'hydrogène comme levier de décarbonation du gaz du réseau

Dans le cadre de ce scénario, le développement de l'hydrogène pour la mobilité et pour de nouveaux usages industriels est faible voire anecdotique, hormis dans les besoins relatifs à l'hydrogénation des huiles et le transport recourant aux technologies thermiques.

L'hydrogène est essentiellement utilisé pour la production de gaz de synthèse en couplage avec la méthanisation *(Graphique 4)*. Cette production de gaz de synthèse permet une décarbonation profonde des gaz circulant dans les réseaux et *in fine* des usages du gaz : mobilité, habitat et industrie. Ainsi, la production d'hydrogène pour le méthanol et l'engrais continue de s'appuyer sur les procédés actuels de vaporeformage.

Le mise à disposition d'un gaz très faiblement carboné donne l'opportunité d'une réimplantation des usines de méthanol sur le territoire et ainsi celle de ne plus importer ce produit chimique, composé important pour la synthèse des biocarburants première génération (1G).

Graphique 4 Consommation d'hydrogène par secteur en 2019, 2030 et 2050 en TWh, dans le scénario S1



Les productions d'hydrogène pour le raffinage, l'hydrogénation des huiles et le *power-to-gas* sont à l'inverse basés sur l'électrolyse. Cependant, la majorité des électrolyseurs étant en lien avec la production de gaz de synthèse, en complément à la méthanisation, leur puissance unitaire est limitée à quelques MW. Cet usage de l'hydrogène est un usage décentralisé, localisé au niveau des unités de méthanisation permettant d'augmenter le productible de gaz à partir de la même ressource en biomasse fermentescible.

La consommation totale d'hydrogène atteint 55,2 TWh en 2050 avec une puissance d'électrolyse de 20,1 GW comme le précise le *Tableau 3*. La période 2028-2050 est la période clé de déploiement des électrolyseurs en couplage des unités de méthanisation et principal usage consommateur d'hydrogène en 2050.

Tableau 3 Synthèse des résultats dans S1

	2019	2030	2050
Consommation d'H_2 en TWh	20,7	22	55,2
Consommation d'H_2 en TWh (hors autoconsommation raffinage)	14	17,1	55,2
Part électricité/gaz pour la production d'H_2 (hors autoconsommation raffinage)	0 %/100 %	23 %/77 %	81 %/19 %
Consommation énergétique : • Électricité en TWh • Gaz en TWh	 0 20	 6,1 18,7	 62 15,2
Capacités d'électrolyse installées en France en GW	0	1,8	20,1
Capacités de production d'électrolyseur nécessaires pour alimenter le marché intérieur GW/an	0	1,3	1,8

5.3. Scénario 2 : une panoplie d'usages directs et indirects

Ce scénario apparaît comme relativement équilibré sur la répartition des usages de l'hydrogène : une majorité est pour des usages diffus (*power-to-gas* et mobilité) auxquels s'ajoutent des usages industriels plus centralisés comme la production d'engrais, de méthanol, la synthèse de carburants liquides et la réduction de l'acier dans des unités DRI. Ces typologies d'usages induisent une répartition sur la taille des électrolyseurs :

- du MW à la dizaine de MW pour les usages diffus (mobilité et *power-to-gas*) ;
- plusieurs centaines de MW pour les usages industriels et centralisés (méthanol, acier, engrais, *power-to-liquid*).

C'est le scénario, avec S3, présentant la consommation d'hydrogène la plus élevée : elle atteint 96 TWh d'hydrogène en 2050.

La production en 2050 repose exclusivement sur l'électrolyse. Il est à noter un point de passage en 2030 avec une répartition quasi équivalente entre gaz et électricité. En 2030, les secteurs sur lesquels ce déploiement d'électrolyse s'appuie sont ceux de la mobilité, du *power-to-gas* et de la sidérurgie *(Graphique 5)* avec le déploiement de la technologie DRI (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

Cette transition forte en faveur de l'hydrogène électrolytique se traduit par des capacités de production nécessaires assez conséquentes (plus de 2 GW/an sur la période 2030-2050) pour satisfaire les besoins de nouvelles installations et de renouvellement *(Tableau 4)*. Les usages permettant les déploiements des électrolyseurs avant 2030 sont la mobilité, le *power-to-gas*, les engrais, la sidérurgie (DRI) et le méthanol avec une très forte accélération sur les années 2027 à 2030. La présence des électrolyseurs dans ces secteurs se renforce après 2030 ; en complément l'émergence de nouveaux usages tels que le *power-to-liquid* vient renforcer les demandes en électrolyse.

Graphique 5 *Consommation d'hydrogène par secteur en 2019, 2030 et 2050 en TWh, dans le scénario S2*

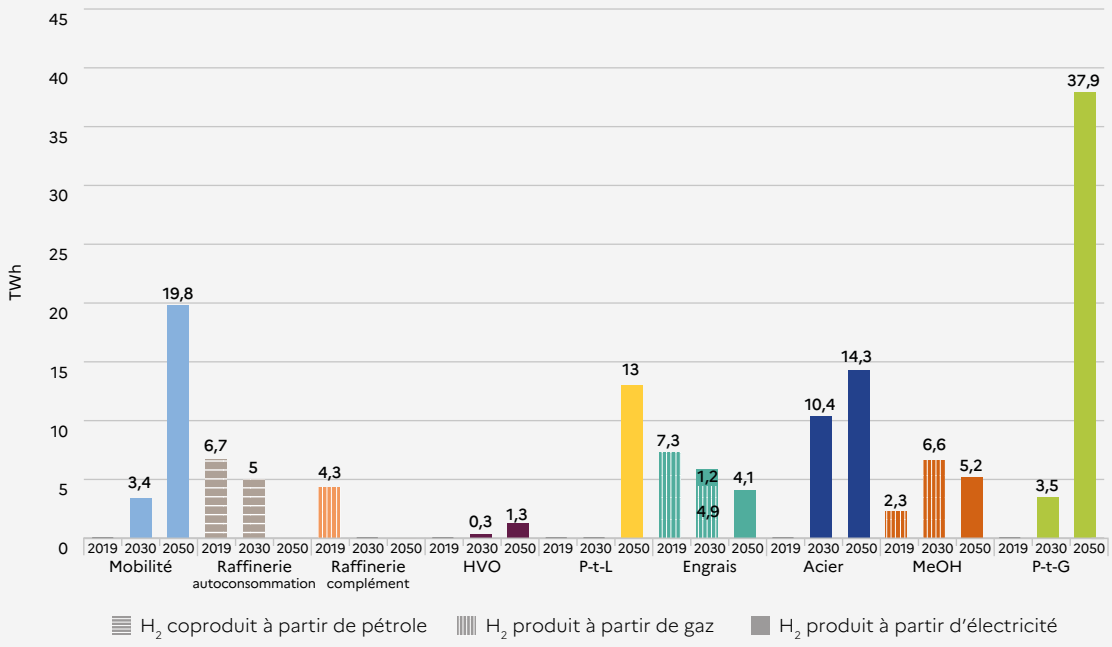


Tableau 4 *Synthèse des résultats dans S2*

	2019	2030	2050
Consommation d'H_2 en TWh	20,7	35,2	95,7
Consommation d'H_2 en TWh (hors autoconsommation raffinage)	14	30,3	95,7
Part électricité/gaz pour la production d'H_2 (hors autoconsommation raffinage)	0 %/100 %	62 %/38 %	100 %/0 %
Consommation énergétique :			
• Électricité en TWh	0	28,8	135
• Gaz en TWh	20	16,4	0
Capacités d'électrolyse installées en France en GW	0	5,1	30,1
Capacités de production d'électrolyseur nécessaires pour alimenter le marché intérieur GW/an	0	2,3	2,5

5.4. Scénario 3 : une consommation massive d'hydrogène pour tous les usages avec un recours aux importations

Ce scénario est également relativement équilibré sur la répartition des usages de l'hydrogène. Mais contrairement au scénario précédent, une majorité d'entre eux sont centralisés (méthanol, réduction de l'acier dans les hauts fourneaux et engrais), et cohabitent avec les usages diffus (mobilité et *power-to-gas*) *(Graphique 6)*. Le cumul des besoins d'hydrogène atteint 93,9 TWh en 2050. À ces volumes consommés sur le territoire national, on peut considérer l'importation de carburants liquides de synthèse (*cf.* chapitre *2.3.4. Carburants liquides*) comme consommatrice indirecte d'hydrogène (6,4 TWh en 2050). La consommation totale d'hydrogène, directe et indirecte, s'élève donc, pour ce scénario, à légèrement plus de 100 TWh.

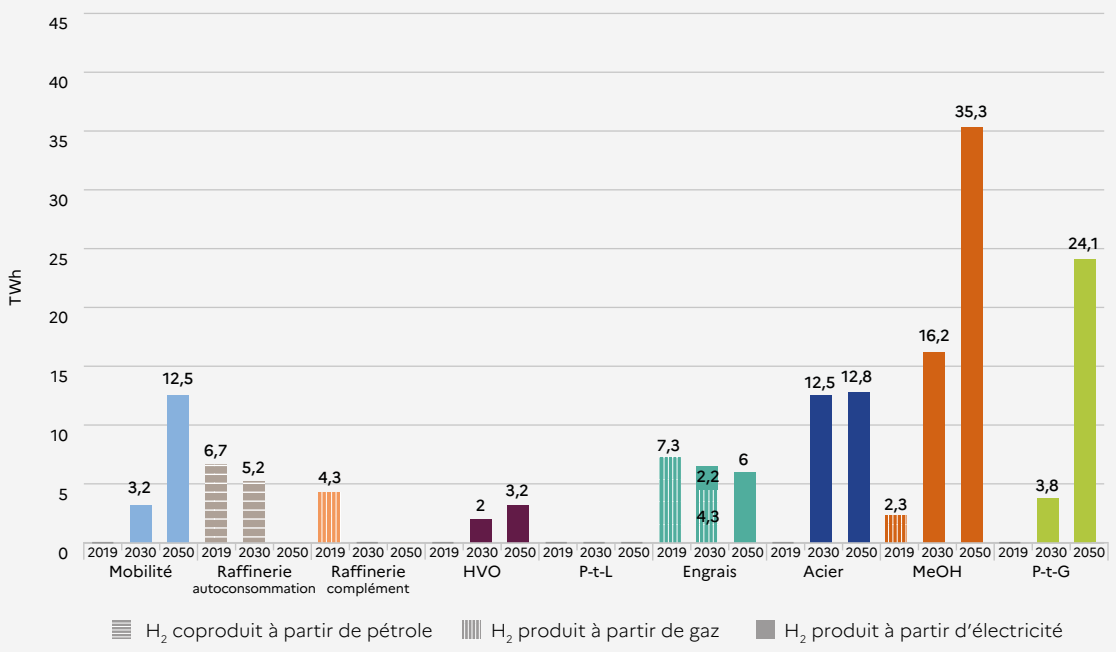
Par ailleurs ce scénario repose sur une importation conséquente d'hydrogène, de l'ordre de 48 TWh en 2050.

Toute la production en 2050 s'appuie sur des moyens d'électrolyse, avec un point de passage en 2030 très ambitieux (89 % de l'hydrogène produit par électrolyse à cet horizon). Cette croissance rapide de l'électrolyse, face au vaporeformage, répond aux forts besoins émergents avant 2030 pour la création d'une filière de e-méthanol alimentant elle-même la filière oléfine, ainsi que les forts besoins que nécessite la réduction de l'acier dans les hauts fourneaux. De ce fait, le rythme d'installation des électrolyseurs en 2030 est très élevé (> 3 GW/an) et ralentit ensuite *(Tableau 5)*.

Ces usages, grands consommateurs d'hydrogène et centralisés, font leur apparition dès 2030, ce qui nécessite la mise en place d'un réseau de transport d'hydrogène par canalisations ainsi que des capacités de stockage en cavités salines. Ces infrastructures mettent en relation des moyens de production et des consommateurs massifs, tout en sécurisant leur approvisionnement. La baisse de la consommation de gaz est par ailleurs un autre facteur conjoncturel qui permet l'émergence de ces pipes hydrogène : les zones industrielles étant positionnées sur des lignes de gaz doublées, une conversion d'une des deux lignes de gaz est possible et permet une transition vers ce réseau hydrogène à moindre coût [11].

De plus, ces pipes permettent un déploiement des électrolyseurs tout le long de cette « dorsale hydrogène » pour répartir les consommations en eau et en électricité sur le territoire et non plus en quelques points ce qui représente certains risques. Cette infrastructure hydrogène plus décentralisée présente des avantages en termes de robustesse et de résilience : c'est notamment le cas concernant le stress

Graphique 6 Consommation d'hydrogène par secteur en 2019, 2030 et 2050 en TWh, dans le scénario S3



hydrique, auquel contribueront les électrolyseurs, accentué par les effets du changement climatique. Les infrastructures s'appuient sur des capacités de stockage en cavité saline. Elles se développent dès 2030 avec 28 TWh de stockage, pour atteindre 55 TWh en 2050 *(Tableau 5)*.

Deux modes de développement (programmation, financement) sont envisageables pour les réseaux hydrogène : dans le cadre de régulations publiques comme c'est le cas actuellement pour les réseaux électrique et gazier, ou en dehors de ce cadre régulé, sur la base d'opportunités et d'investissements privés qui ont prévalu jusqu'à aujourd'hui pour le réseau de pipes hydrogène présents dans le Nord de la France. Nous avons privilégié cette seconde option de développement, sur la base d'initiatives et d'investissements d'opérateurs privés. Ce choix conduit par ailleurs à recourir à une part importante d'importation d'hydrogène. Certaines régions européennes bénéficient en effet de gisements d'électricité renouvelable importants (solaire, éolien) et donc de capacités de production d'hydrogène à coûts plus faibles. Ainsi ces infrastructures permettent d'importer 48 TWh d'hydrogène sur le territoire national.

Tableau 5 Synthèse des résultats dans S3

	2019	2030	2050
Consommation d'H_2 en TWh	20,7	49,4 (dont 6 importés)	93,9 (dont 48 importés)
Consommation d'H_2 en TWh (hors autoconsommation raffinage et importations P-t-L)	14	44,2 (dont 6 importés)	93,9 (dont 48 importés)
Part électricité/gaz pour la production d'H_2 (hors autoconsommation raffinage)	0 %/100 %	89 %/11 %	100 %/0 %
Consommation énergétique :			
• Électricité en TWh	0	52,2 (hors import H_2 équivalent à 9,2)	65,1 (hors import H_2 équivalent à 66,7)
• Gaz en TWh	20	6,1	0
Capacités d'électrolyse installées en France en GW	0	11,8	28,8
Capacités de production d'électrolyseur nécessaires pour alimenter le marché intérieur GW/an	0	3,2	1,7
Capacité de stockage d'H_2 en cavité saline en TWh	0	28	55

5.5. Scénario 4 : la concurrence d'autres technologies compromet la place de l'hydrogène

La place de l'hydrogène dans ce scénario est largement impactée par l'émergence d'autres technologies, limitant en partie son rôle :

- fort développement de la technologie de CCS dans l'industrie (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). Ainsi, pour les secteurs historiques, engrais et méthanol, le recours au vaporeformage de gaz couplé au CCS devient la norme aux dépens de l'implantation d'électrolyseurs, non nécessaires pour couvrir les besoins de ces secteurs ;

- en parallèle, l'émergence de canalisations de CO_2 crée un terrain favorable au développement massif des technologies DACCS (*direct air carbon capture and storage*), concurrentes du *power-to-gas* moins efficace qui ne se développe pas (*cf.* chapitre *2.3.1. Mix gaz*), sous réserve de la compétitivité de cette solution qui reste à démontrer ;

- la technologie des batteries pour la mobilité connaît de nombreuses avancées technologiques et permet de repousser les limites actuelles pour les véhicules électriques, annihilant l'opportunité de recourir à l'hydrogène pour décarboner les transports.

L'électrolyse se développe pour alimenter les nouveaux usages de l'hydrogène (*power-to-liquid*, hydrogénation des huiles végétales) et pour la mobilité *(Graphique 7)*. Certains de ces secteurs commencent à apparaître dès 2030 en permettant d'initier une demande d'électrolyseurs sur le marché français. Cependant, les faibles volumes d'hydrogène limitent le marché et donc les capacités industrielles nécessaires pour répondre à ces besoins *(Tableau 6)*. Les capacités unitaires des usines européennes actuelles sont inférieures mais proches de ces valeurs pour 2030 et 2050 (0,4 GW/an).

Graphique 7 Consommation d'hydrogène par secteur en 2019, 2030 et 2050 en TWh, dans le scénario S4

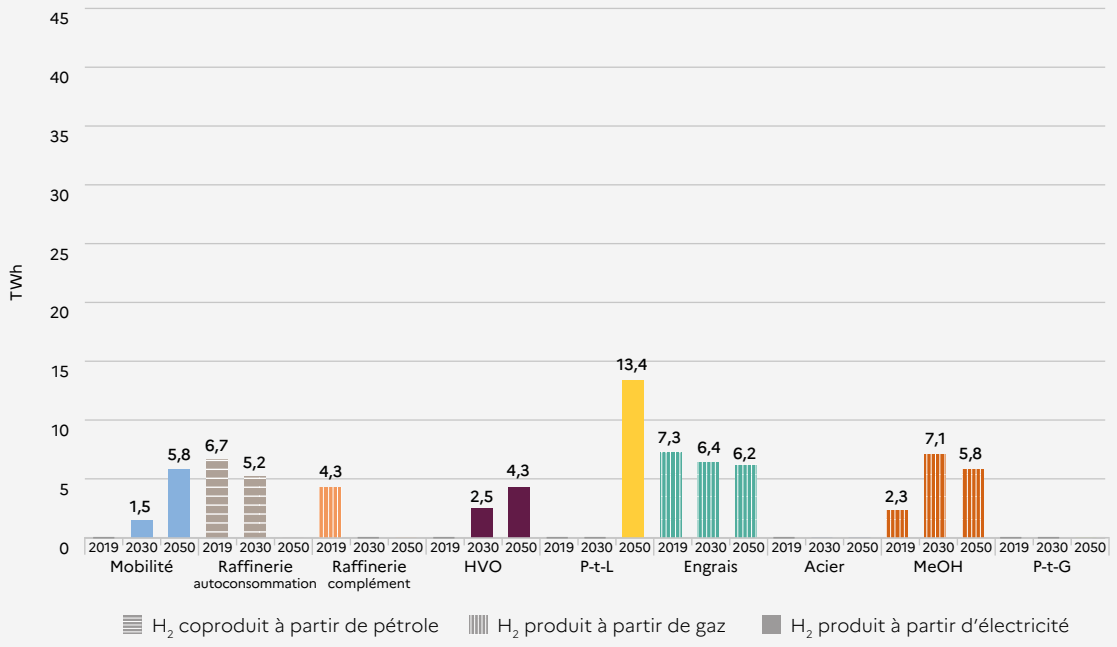


Tableau 6 Synthèse des résultats dans S4

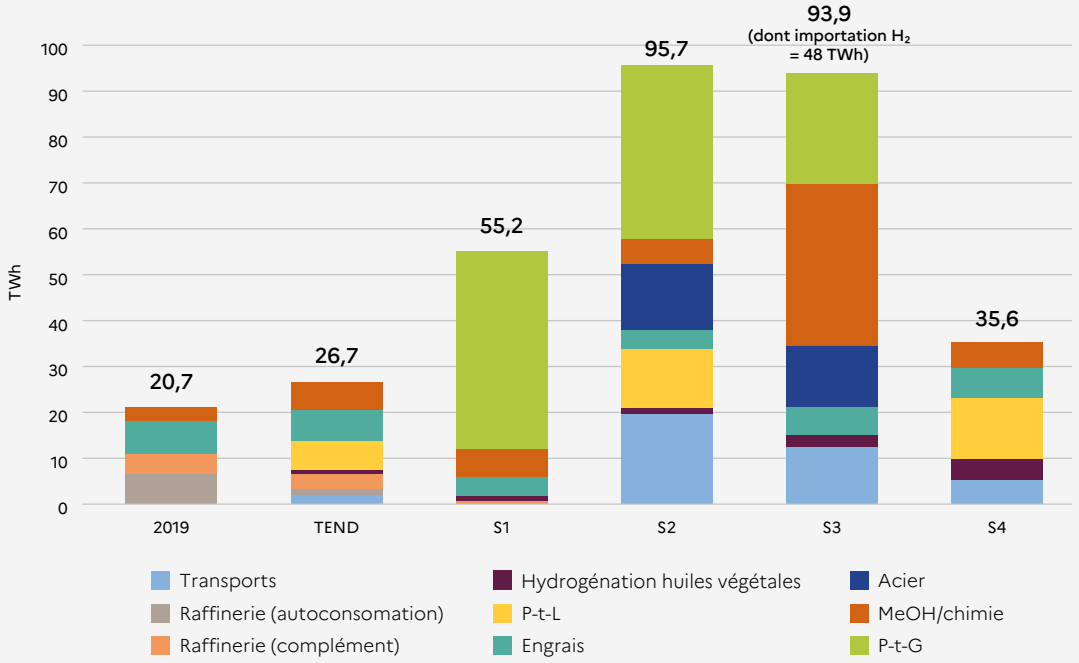
	2019	2030	2050
Consommation d'H_2 en TWh	20,7	22,7	35,6
Consommation d'H_2 en TWh (hors autoconsommation raffinage)	14	17,5	35,6
Part électricité/gaz pour la production d'H_2 (hors autoconsommation raffinage)	0 %/100 %	23 %/77 %	66 %/34 %
Consommation énergétique : • Électricité en TWh • Gaz en TWh	 0 20	 6,2 19,2	 33,3 17,3
Capacités d'électrolyse installées en France en GW	0	0,9	4,8
Capacités de production d'électrolyseur nécessaires pour alimenter le marché intérieur GW/an	0	0,4	0,4

5.6. Comparaison des scénarios

Afin de permettre une comparaison des volumes d'hydrogène par secteur, le *Graphique 8* rassemble les consommations d'hydrogène pour les différents scénarios présentés précédemment (TEND, S1, S2, S3 et S4).

Il faut rappeler que ces valeurs ne sont que des résultantes de trajectoires dans les différents secteurs (industrie, mobilité, réseaux). Le lecteur est donc invité à se reporter aux chapitres propres aux secteurs concernés pour disposer des analyses contextuelles des hypothèses relatives aux différents usages.

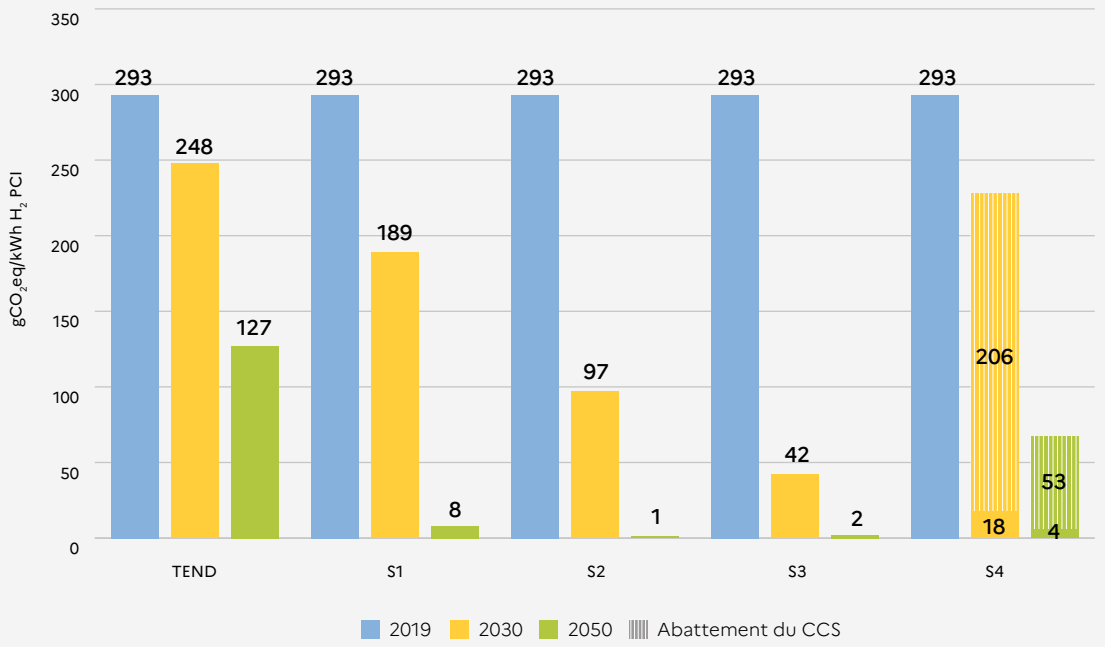
Graphique 8 Bilan des consommations d'hydrogène en 2050 pour les différents scénarios, incluant l'autoconsommation des raffineries



Tous ces scénarios présentent donc une consommation d'hydrogène en 2050 supérieure à la consommation initiale en 2019 (20 TWh). Les scénarios 2 et 3 sont ceux qui reposent sur des consommations d'hydrogène les plus élevées, avec cependant une différence notable : la consommation dans S2 est tirée majoritairement par des usages diffus, tandis que celle du S3 est centralisée.

Quel que soit le scénario, le facteur d'émission de l'hydrogène diminue *(Graphique 9)*. Cette tendance de fond est liée à la baisse du facteur d'émissions du gaz mais aussi au recours à l'électrolyse.

Graphique 9 Évolution des facteurs d'émission moyens pour la production française d'hydrogène dans les différents scénarios



6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures

6.1. Électrolyse : technologie sans regret, mais pour quels secteurs ?

On peut faire le constat que, pour tous les scénarios, les consommations d'hydrogène sont supérieures à celle d'aujourd'hui (jusqu'à 4,5 fois) et que la technologie d'électrolyse est indispensable pour contribuer à la neutralité carbone. Il s'agit donc d'une « technologie sans regret » à développer.

Cependant, les secteurs et usages pour lesquels cette solution technologique se développe divergent selon les scénarios comme l'illustre le *Tableau 7*. **Ainsi il n'est pas évident de définir *a priori* un secteur à privilégier en particulier et cela constitue une problématique de politique industrielle à résoudre dans les années à venir pour les pouvoir publics**. Dans quels secteurs soutenir le développement de l'électrolyse pour favoriser son émergence et l'industrialisation de cette technologie ? Quelles priorités entre raffinage, hydrogénation des huiles, *power-to-liquid*, engrais, acier, méthanol et *power-to-gas* ?

Sur la base de cet exercice de prospective, **il semble contre-productif d'investir dans des électrolyseurs pour les besoins du secteur raffinage.** En effet, ce secteur devrait être excédentaire en hydrogène en 2030, du fait de la forte progression de l'essence vis-à-vis du diesel. L'hydrogène comme coproduit des coupes pétrolières sera suffisant à cet horizon pour subvenir aux besoins de la désulfurisation. Par ailleurs, d'ici 2050 le parc de raffineries disparaîtra dans S2, S3 et S4 et une seule demeure dans S1. Aussi, il ne semble pas stratégique d'investir dans des électrolyseurs pour ce secteur du raffinage.

Tableau 7 Synthèse des modes de production et des secteurs consommant de l'hydrogène en 2050

	TEND	S1	S2	S3	S4
Mobilité H_2					
Raffinerie					
Hydrogénation huiles					
P-t-L				Import	
Engrais					
Acier					
Méthanol					
P-t-G					
Capacités d'électrolyse nécessaires en France en 2030 (GW)	0,3	1,8	5,1	11,8	0,9
Capacités d'électrolyse nécessaires en France en 2050 (GW)	2,4	20,1	30,1	28,8	4,8

H_2 produit par électrolyse (électricité) — H_2 produit par reformage de gaz

6.2. 2020-2030, une décennie cruciale pour rendre compétitive l'électrolyse

Dans cet exercice prospectif, de nouveaux secteurs consommateurs d'hydrogène doivent émerger avant 2030 pour que leurs trajectoires de décarbonation soient en ligne avec la neutralité carbone en 2050.

Ces secteurs précurseurs sont :

- **la mobilité hydrogène**, plus particulièrement dans S2 et S3 ;
- **le *power-to-gas* et notamment le couplage méthanisation-méthanation**, pour tous les scénarios sauf S4 ;
- **la production de méthanol** dans S3 ;
- **les usages en sidérurgie** (DRI pour S2 et dans les hauts fourneaux dans S3).

La capacité du parc d'électrolyseurs installés en 2030 varie ainsi de 0,9 GW (S4) à 11,8 GW (S3), ce qui suppose donc un rythme moyen d'investissement soutenu sur la décennie, de 0,1 à 1,2 GW/an, et des usines capables de fabriquer ces équipements. Compte tenu du temps nécessaire à l'émergence de ces usines, le déploiement du parc se concentrera sur la période 2025-2030.

Cependant, d'ici 2030, les moyens de production par électrolyse ne seront pas compétitifs avec les procédés de reformage de gaz naturel *(Graphique 3)*. De plus, les investissements dans les SMR ont déjà été réalisés à grande échelle et bénéficient de prix du gaz favorables. On estime ainsi que l'hydrogène produit par électrolyse resterait supérieur à 3 EUR/kg dans le meilleur des cas, soit au-delà du coût de revient de l'hydrogène produit par vaporeformage.

En cohérence avec les capacités d'électrolyse nécessaire en 2030 et 2050 *(Tableau 7)*, on estime que l'industrialisation de la fabrication des électrolyseurs peut permettre de diviser par 3 les coûts d'investissements de cette technologie (1 500 EUR/kW en 2020 ; 500 EUR/kW en 2050). Cette industrialisation n'est cependant possible que dans le cadre d'un volume critique de la demande d'installations de ces équipements sur 2020-2030.

Aussi est-il nécessaire de réduire l'écart des coûts de production actuel pour permettre le déploiement des premières installations sur la décennie 2020-2030. Cette période s'avère en effet critique pour l'industrialisation de cette technologie. Elle nécessite un soutien public continu de la demande d'hydrogène bas carbone ou des investissements dans des électrolyseurs pour générer un volume critique et baisser les coûts. Parmi les pistes de soutien public possibles, on peut évoquer :

- **l'exonération totale ou partielle du TURPE (tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité) pour les électrolyseurs à partir d'une puissance de 1 MW afin de couvrir l'intégralité des usages, de la mobilité à l'industrie en passant par le *power-to-gas***. Cela permettrait de réduire les coûts d'approvisionnement en électricité, de l'ordre de 20 EUR/MWh électrique, ce qui réduirait le coût de production de l'hydrogène de 1 EUR/kg environ. En 2030, les installations d'électrolyse pourraient ainsi produire de l'hydrogène à un coût inférieur à 2,5 EUR/kg, ce qui est relativement compétitif par rapport au vaporeformage, soumis à la Directive EU-ETS sur ses émissions ;
- **abandon de l'exemption de TICGN (taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel) dont bénéficie la production d'hydrogène carboné, de méthanol et d'engrais à partir de gaz**. Le cadre fiscal européen actuel[6] exempte de taxes les consommations de ressources fossiles à double usage, dont la production d'hydrogène à des fins matière. Ainsi en France, les installations industrielles sont exemptées de TICGN (8,45 EUR/kWh PCS). La révision de cette exemption sur des consommations fossiles se traduirait par un renchérissement du coût de revient de l'hydrogène carboné de l'ordre de 0,5 EUR/kg, réduisant d'autant l'écart avec le coût de l'hydrogène bas carbone produit par électrolyse. Les recettes liées à cette hausse de taxes par l'État, de l'ordre de 200 MEUR/an, pourraient être affectées au soutien à l'hydrogène bas carbone ;
- **mise en place d'un tarif d'achat pour le gaz de synthèse**. Le *power-to-gas* apparaît dans nos scénarios, excepté dans S4, comme incontournable pour décarboner le contenu du réseau de gaz. En complément de l'exonération du TURPE pour les électrolyseurs, un tarif d'achat du gaz de synthèse, à l'instar de ce qui a été mis en place pour favoriser la méthanisation, pourrait être envisagé pour soutenir son développement. Les synergies avec les instal-

6 Directive 2003/96/CE, article 2.

lations de méthanisation sont assez fortes. Ainsi, un tarif d'achat identique à l'injection des deux gaz serait une solution opérante. En effet, elle reposerait sur les mêmes installations de purification, de comptage et d'injection. Le CO_2 utilisé pour la méthanation étant dans ce cas d'origine biologique, ces deux gaz pourraient avoir le même statut de gaz renouvelable ;

- **ajustement carbone aux frontières relatif à l'importation d'hydrogène**. Les besoins d'hydrogène pourront à l'avenir reposer sur une importation partielle d'hydrogène, comme c'est le cas dans S3. Afin de ne pas défavoriser la production d'hydrogène sur le territoire et éviter des fuites de carbone, il sera nécessaire d'appliquer à l'hydrogène le futur mécanisme d'ajustement carbone aux frontières. Les importations d'hydrogène hors EU doivent ainsi prendre en compte les émissions de CO_2 induites par les procédés de production et de transport mobilisés pour acheminer cet hydrogène en Europe ;

- **fiscalité carbone**. De manière plus générale, la mise en place d'une taxe carbone stable et pérenne serait un facteur permettant de rehausser le coût en hydrogène carboné et de baisser celui de l'hydrogène bas carbone, ce qui favoriserait dès 2020-2030 les investissements compatibles avec la trajectoire de neutralité carbone.

6.3. Stratégie française de l'hydrogène et vision long terme

Les résultats et enseignements de cet exercice prospectif de long terme concernant l'hydrogène confortent les axes de la récente Stratégie nationale hydrogène qui repose sur :

- **la construction d'une filière française de l'électrolyse**, en s'appuyant sur un déploiement des électrolyseurs dans des secteurs industriels consommateurs d'hydrogène. L'opportunité de développer l'électrolyse dans le secteur du raffinage est cependant remise en cause dans le cadre de ces scénarios prospectifs ;

- **le développement de l'offre de la mobilité lourde hydrogène** et le soutien aux usages *via* des premiers écosystèmes dans les territoires ;

- **la poursuite des actions de recherche et d'innovation**, notamment pour préparer les solutions futures et les nouveaux usages. L'exercice prospectif tend cependant à montrer que le *power-to-gas* est une solution incontournable et qu'il serait opportun d'amorcer un accompagnement par une tarification dédiée dès la décennie 2020-2030 et plus précisément après 2027 ou 2028.

7. D'autres facteurs, exogènes ou technologiques, pourront impacter le développement de l'hydrogène

Les scénarios prospectifs relatifs à l'hydrogène sont à considérer comme une résultante d'un faisceau d'hypothèses sur l'offre et la demande d'hydrogène. Comme exposé précédemment dans la *section 3.1*, le recours à l'hydrogène est spécifique à chaque usage, en fonction du contexte propre à chaque secteur qui a sa trajectoire de décarbonation spécifique et bénéficie d'un panel de solutions possibles, dont l'hydrogène. Ainsi, les limites des scénarios hydrogène sont essentiellement liées aux trajectoires définies pour chaque secteur (bâtiment, réseaux, industries et transports) et les conclusions sont fortement impactées par les récits et les choix sectoriels.

PÉRIMÈTRE TECHNOLOGIQUE

Certaines technologies de production d'hydrogène ont été écartées de cet exercice prospectif, pour des raisons de maturité technologique et en l'absence de retour d'expérience établi. Pour rappel ces technologie sont la pyrogazéification de la biomasse, l'électrolyse haute température et la décomposition plasma du gaz. Ces technologies pourront être considérées lors de prochains exercices, si leur faisabilité est confirmée à travers les premières démonstrations et leur intérêt environnemental avéré sur la base d'analyses de cycle de vie.

MATIÈRES PREMIÈRES ET RECYCLAGE

Les technologies d'électrolyse et de pile à combustible reposent sur des matériaux tels que le nickel, le platine et le titane. Dans cet exercice prospectif, les technologies PEM et alcaline ont été considérées sous une seule et unique technologie afin de simplifier les modélisations et les consommations en ressources de ces technologies seront des éléments déterminants dans le déploiement de ces solutions. La mise en place de filières recyclage sera nécessaire afin de diminuer les contraintes matériaux et permettre la réutilisation de ces métaux et ce avant 2030.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ACCÈS À L'EAU

Dans cet exercice, l'électrolyse est confirmée comme technologie clé pouvant répondre à la majorité des consommations d'hydrogène et permettant de décarboner sa production. Cependant cette technologie consomme de l'eau, de 10 à 20 litres d'eau par kilo d'hydrogène produit au niveau de l'électrolyseur. Au global, en fonction des capacités d'électrolyse installées, cela peut représenter des volumes d'eau qui ne peuvent pas être négligés, d'autant plus que l'eau consommée par les électrolyseurs doit être de grande pureté et donc purifiée. 30 à 60 Mm³ d'eau seraient ainsi nécessaires pour produire 100 TWh d'hydrogène par électrolyse, soit 0,45 à 0,9 m³ par habitant pour une consommation d'eau potable actuelle de 53 m³ par an et par habitant.

Même si nous parvenons à maintenir le réchauffement climatique sous la barre des 2 °C, le stress hydrique fait partie des impacts climatiques physiques attendus. Des concurrences d'usage de l'eau devraient apparaître dans certains territoires. Dans cette perspective, l'électrolyse de l'eau de mer est une voie de développement à considérer comme stratégique pour libérer des contraintes locales sur l'eau douce. La mise en place d'un réseau hydrogène par pipe, comme modélisé dans S3, est aussi une solution permettant de répartir les électrolyseurs le long d'une dorsale formée par cette infrastructure de transport de l'hydrogène. Cette solution permettrait de répartir les consommations en eau et en électricité sur un territoire large, plutôt que localisé sur quelques sites de consommation d'hydrogène [12] [13] [14].

8. Des évolutions possibles ainsi que d'autres hypothèses de scénarios possibles

Dans le cadre de chacun de ces scénarios ou univers prospectifs, des travaux complémentaires pourraient être menés ou d'autres choix auraient pu être faits, par exemple :

Scénarios 1 et 2

POUR ALLER PLUS LOIN

- La modélisation au pas horaire du système électrique, qui fera l'objet d'une publication ultérieure, permet d'assurer un fonctionnement des électrolyseurs pour produire les volumes prévus. Une analyse plus fine pourrait être réalisée, pour affiner les taux de charge, les coûts de l'électricité en fonction des temps de fonctionnement et les capacités d'électrolyse induites.

AUTRES CHOIX

- Des usages thermiques de l'hydrogène en industrie, en combustion directe, auraient pu être ajoutés, ne reposant pas sur des innovations majeures. Cela nécessiterait cependant d'autres arbitrages dans la modélisation des systèmes électrique et gaz.

Scénario 3

POUR ALLER PLUS LOIN

- La modélisation au pas horaire du système électrique, qui fera l'objet d'une publication ultérieure, permet d'assurer un fonctionnement des électrolyseurs pour produire les volumes ci-dessus. Une analyse plus fine pourrait être réalisée, pour affiner les taux de charge, les coûts de l'électricité en fonction des temps de fonctionnement et les capacités d'électrolyse induites.

AUTRES CHOIX

- Des usages thermiques de l'hydrogène en industrie, en combustion directe, auraient pu être ajoutés, ne reposant pas sur des innovations majeures. Cela nécessiterait cependant d'autres arbitrages dans la modélisation des systèmes électrique et gaz.
- Le déploiement des véhicules électriques hydrogène pour les particuliers aurait également pu s'inscrire dans ce scénario, avec des parts de marché plus conséquentes. Cela nécessiterait de trouver un équilibre entre les consommations totales d'hydrogène, les ressources électriques et l'importation d'hydrogène à coût faible. Il pourrait donc permettre l'émergence de ces usages.
- L'électrolyse haute température pourrait également trouver une place, en substitution partielle des technologies d'électrolyse classiques, sous réserve de disponibilité de vapeur en industrie et pour des usages industriels de l'hydrogène.
- Les technologies de pyrogazéification de biomasse, dans le cadre de contraintes moins sévères sur les ressources en biomasse, pourraient également contribuer à une production d'hydrogène nationale plus abondante.
- La décomposition de gaz par plasma (pyrolyse de gaz) pourrait aussi être mobilisée, mais cette technologie interroge la place du *power-to-gas* : quel intérêt de produire du gaz de synthèse pour ensuite le décomposer afin d'en retirer l'hydrogène ?

Scénario 4

POUR ALLER PLUS LOIN

- La modélisation au pas horaire du système électrique, qui fera l'objet d'une publication ultérieure, permet d'assurer un fonctionnement des électrolyseurs pour produire les volumes ci-dessus. Une analyse plus fine pourrait être réalisée, pour affiner les taux de charge, les coûts de l'électricité en fonction des temps de fonctionnement et les capacités d'électrolyse induites.

AUTRES CHOIX

- **Le déploiement des véhicules électriques hydrogène** pour les particuliers aurait également pu s'inscrire dans ce scénario. Ce scénario s'appuyant sur un pari technologique concernant les batteries, il peut aussi être envisagé un pari technologique plus favorable aux technologies hydrogène, en cas de défaillance ou des limites constatées sur les technologies batterie.

- **L'électrolyse haute température** pourrait également trouver une place, en substitution partielle des technologies d'électrolyse classiques, sous réserve de disponibilité de vapeur en industrie et pour des usages industriels de l'hydrogène.

- **Les technologies de pyrogazéification de biomasse**, dans le cadre de contraintes moins sévères sur les ressources, pourraient également contribuer à une production d'hydrogène nationale plus abondante.

- **La décomposition de gaz par plasma** (pyrolyse de gaz) pourrait aussi être mobilisée.

- **Le recours aux sources d'hydrogène naturel** est également une hypothèse qui pourrait être retenue pour ce scénario.

9. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **AFHYPAC, EY, HINICIO**, *Étude de la demande potentielle d'hydrogène renouvelable et/ou bas carbone en France à 2030*, 2020.

[2] **Base Carbone ADEME** : https://www.bilans-ges.ademe.fr/.

[3] **IEAGHG**, *Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Plant with CCS*, Rapport, 2017, 286 pages.

[4] **Avis de l'ADEME**, *Captage et stockage géologique de CO_2 (CSC) en France*, 2020 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/69-avis-de-l-ademe-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france.html).

[5] https://www.delta-ee.com/our-downloads/shining-the-light-on-clean-hydrogen-whitepaper.html.

[6] **IRENA**, *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.

[7] **ADEME, GRTgaz, GRDF**, *Étude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire*, Rapport, 2014, 238 pages.

[8] **CEA, DGEC**, *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique. Rapport à Monsieur le Ministre de la Transition Écologique et Solidaire*, 2018, 64 pages.

[9] **IEA**, *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan*, Rapport, 2019, 203 pages.

[10] **Isabelle Martinez *et al.***, *H_2 naturel. Position paper*. ANCRE, 2019, 8 pages.

[11] **Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas, Teréga**, *European Hydrogen Backbone. How a dedicated Hydrogen Infrastructure can be created*, Gasforclimate2050, Rapport, 2020, 29 pages.

[12] **HCC**, *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation. Rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat*, 2021, 184 pages.

[13] **GIEC**, *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Genève, Suisse, 2014, 161 pages.

[14] **EEA**, *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 An indicator-based report*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2017, 424 pages.

04

RESSOURCES ET PUITS DE CARBONE

541 Déchets

574 Ressources et usages non alimentaires de la biomasse

613 Puits de carbone

04 RESSOURCES ET PUITS DE CARBONE

1. Déchets

1. Les déchets à la croisée des enjeux matière et énergie
542

2. Rétrospective des tendances
544

3. Description de l'état actuel
546

4. Méthode d'élaboration des scénarios
548

5. Description des scénarios
550

6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures
568

7. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs
571

8. Références bibliographiques
572

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur
573

1. Les déchets à la croisée des enjeux matière et énergie

Les déchets sont définis dans l'UE comme « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire[1] ». Une définition similaire existe en France à l'article L. 541-1-1 du Code de l'environnement : « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon. » En revanche, les notions de coproduits ou sous-produits ne sont pas définies légalement.

Sur le plan statistique européen, le Règlement de 2002[2] ne considère pas comme des déchets les produits ou substances valorisés au sein de l'unité économique qui les produit, par exemple des chutes de production remises dans le process de fabrication de l'usine, des déjections animales épandues sur l'exploitation agricole qui les a produites ou le compostage domestique chez les particuliers.

Mais les déchets sont avant tout de la matière. Jeter des déchets, c'est donc jeter de la matière. Or une partie de cette matière est récupérable afin de la réintroduire dans le circuit économique et éviter de puiser dans les ressources naturelles. En 2017, dans le monde, seulement 8,6 Gt de déchets sont recyclés sur 32,6 Gt produits, ce qui est très peu au regard des 92 Gt de ressources naturelles consommées (dont ⅔ pour les minéraux et matériaux de construction et ⅓ pour la biomasse et les énergies fossiles) [1].

C'est pour cela que la gestion des déchets doit d'abord faire l'objet de mesures de prévention pour en diminuer la quantité et la dangerosité. Ensuite, elle doit répondre à une hiérarchie qui prévoit, dans l'ordre : le recyclage matière, la valorisation énergétique et enfin l'incinération sans récupération d'énergie et le stockage définis sous le terme d'élimination dans la terminologie européenne.

Le domaine des déchets, qui a très fortement évolué dans toutes ses composantes depuis les années 1990, est très règlementé tant au niveau européen qu'au niveau national et fait l'objet de multiples objectifs chiffrés sur tous les segments de leur gestion. Il est complété par des règlements sur l'économie circulaire[3], notamment sur l'écoconception des produits, sur la consommation, sur la réparabilité, sur la responsabilité des producteurs et metteurs en marché, sur la fiscalité ou encore, au niveau national, avec un objectif de diminution de l'intensité matière du PIB entre 2010 et 2030.

Plus précisément, les impacts des politiques de gestion des déchets sur les autres matières premières, les GES ou l'énergie se retrouvent dans les segments suivants, chacun étant sensible à des freins et des leviers différents :

- **prévention** : éviter de produire des déchets est le meilleur moyen de diminuer l'impact sur l'environnement. Cela peut se faire **à tous les stades de vie d'un produit** (fabrication, usage tout au long de la vie, fin de vie) mais également par un changement des habitudes de consommation pour aller vers **la sobriété** qui diminuera les déchets à la source en limitant l'achat de produits. L'effet « prévention de déchets » de la sobriété est d'autant plus puissant qu'il se répercute sur toute la chaîne de valeur : moins de consommation, moins de production, moins d'extraction de ressources. En revanche, l'adaptation des marchés demande un temps d'ajustement. La prévention s'entend aussi comme la diminution de la dangerosité des déchets. Depuis 2010, on observe en France une légère diminution de la production globale de déchets, due quasi exclusivement à la baisse des déchets du BTP, elle-même liée à l'activité du secteur mais pas à des actions spécifiques volontaires de prévention. En revanche, les autres déchets ont plutôt augmenté. Au niveau des déchets ménagers, si des actions sont menées par la plupart des collectivités, les résultats ne sont pas visibles dans les quantités collectées ;

- **le prolongement de la durée de vie des produits** : étape importante de la prévention, cela peut passer par la maintenance, l'entretien, la réparation, le réem-

1 Directive 2008/98/CE modifiée du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, JOCE du 22 novembre 2008.
2 Règlement (CE) n° 2150/2002 du 25 novembre 2002 relatif aux statistiques sur les déchets, JOCE du 9 décembre 2002.
3 Pour plus d'information sur l'économie circulaire : https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire.

ploi ou la réutilisation. Les leviers sont les obligations règlementaires et les incitations économiques poussées par la partie de la population sensible à ce sujet. Mais ce levier se heurte au modèle économique dominant, basé principalement sur le volume de ventes et la valorisation individuelle de la possession, qui pourraient être remplacés par **l'économie de la fonctionnalité et de la coopération**. Pourtant, et même si peu de travaux ont évalué l'impact climatique et énergétique de ces pratiques, on estime que si chaque ménage français avait la possibilité d'augmenter d'un an la durée d'usage de ses équipements, l'économie totale réalisée serait de 27 milliards d'euros et 6 $MtCO_2eq$ [2] ;

- **le recyclage** : il évite l'extraction de matières vierges, diminue les transports dans certains cas ainsi que la quantité d'énergie nécessaire à la production d'un bien à partir de matières vierges. Cependant, les déchets doivent être recyclables (enjeu de **conception des produits**), pouvoir être collectés, triés, conditionnés puis les matières issues du recyclage transportées jusqu'aux lieux de production dans des conditions économiques supportables. Or, **l'économie du recyclage** subit des fluctuations liées aux cours des matières premières vierges (pétrole pour les plastiques, métaux), à l'importance des stocks de bois énergie, au marché du BTP ou encore aux possibilités d'export [3]. L'économie peut donc être un frein ou un moteur.

Cela étant, la France a incorporé 16,8 millions [3] de tonnes de matières recyclées produites en France ou importées, dans ses processus de fabrication en 2017, et 60 Mt en incluant les granulats du BTP. L'acier et la fonte recyclés représentent 49 % des matières premières de recyclage (MPR) réincorporées dans la production industrielle. Le taux d'incorporation[4] du verre recyclé (uniquement dans l'emballage) est de 56 %, celui du papier-carton de 67 %. En revanche, celui des plastiques recyclés n'est que de 5,4 %. En 2017, ces 16,8 Mt de MPR ont permis :

- d'éviter le rejet de 23 millions de tonnes d'équivalent CO_2 (4,8 % des émissions nationales);
- d'économiser 64 TWh de consommation d'énergie cumulée ce qui représente, à titre de comparaison, 11,9 % de la production d'électricité ;
- la gestion de la matière organique : selon qu'elle est compostée, épandue dans de bonnes ou mauvaises conditions, méthanisée ou mise en centre de stockage avec une plus ou moins bonne efficacité du captage du méthane, elle aura des incidences différentes sur les émissions de méthane, sur la production d'énergie renouvelable (biométhane et électricité) et sur l'enrichissement des sols en matières organiques et nutriments comme l'azote, le phosphore et le potassium.

Les obligations règlementaires de valorisation des biodéchets, de diminution des quantités de déchets mises en décharge et de récupération du méthane (CH_4) dans les centres de stockage ont permis de diminuer leurs émissions de 30 % entre 2003 et 2017 pour atteindre 475 kt de CH_4, et de produire 1 130 GWh d'électricité en 2016, soit 3 fois plus qu'en 2004 [1].

Chez les ménages, entre 2007 et 2017, la quantité de biodéchets est passée de 125 kg/hab. à 83 kg/hab. [4]. Cela résulte de la combinaison entre la réduction du gaspillage alimentaire et le développement du compostage domestique (individuel ou en petit collectif). En 2017, le gaspillage alimentaire représentait encore 30 kg/hab. [4].

- **L'incinération des déchets** : directe ou indirecte après tri et conditionnement (pneus broyés, combustibles solides de récupération-CSR), elle permet de produire de l'énergie (électricité, chaleur ou les deux) qui peut se substituer à des énergies fossiles (co-incinération en cimenterie par exemple ou réseaux de chaleur). Elle produit peu de CO_2 au regard des émissions nationales, mais progresse continuellement (+ 75 % entre 1990 et 2017) proportionnellement à l'augmentation des quantités de déchets incinérés. Ces émissions sont cependant compensées par la production d'énergie (4 360 GWh électriques et 9 799 GWh thermiques produits en 2016) [3] grâce à la suppression progressive des unités d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) sans valorisation énergétique et à la co-incinération de déchets, en particulier des CSR.

Concernant les émissions de GES [3] du secteur déchets :

- les émissions de méthane sont principalement issues des installations de stockage. Elles ont fortement diminué depuis 2003, mais elles étaient encore de 13 300 $ktCO_2eq$ en 2017, soit 21 % des émissions françaises de méthane ;
- les émissions de CO_2 étaient de 7,84 Mt en 2017, soit environ 2,5 % des émissions de CO_2.

Par ailleurs, le secteur a permis d'éviter des rejets de GES et de produire de **l'énergie de récupération** en substitution de l'énergie fossile.

4 Le mode de calcul du taux d'incorporation varie selon le matériau étudié. Pour le verre, il s'agit des volumes de calcin incorporés par les verriers. Pour les métaux non ferreux par exemple, il s'agit des volumes de matériau recyclé/volumes de produits fabriqués. Dans tous les cas, il convient de distinguer le taux d'incorporation du taux de recyclage.

2. Rétrospective des tendances

Les définitions des termes utilisés dans cet exercice sont les suivantes :

- **ordures ménagères et assimilés (OMA)** : déchets produits « en routine » par les ménages et les acteurs économiques collectés par le service public, en mélange ou séparément. Cela exclut donc les déchets occasionnels (encombrants, déblais gravats…) ;

- **déchets assimilés** : déchets des activités économiques qui, eu égard à leurs caractéristiques et aux quantités produites, peuvent être collectés et traités avec les déchets des ménages, sans sujétions techniques particulières par les collectivités ;

- **déchets ménagers et assimilés (DMA)** : déchets issus des ménages collectés par le service public y compris apports en déchèterie et déchets assimilés. Les déchets produits par les services municipaux ne relèvent pas de ce périmètre ;

- **déchets municipaux** : ensemble des déchets relevant de la responsabilité des collectivités, c'est-à-dire les DMA et les déchets propres à la collectivité (nettoiement, déchets verts, assainissement collectif) ;

- **déchets d'activités économiques (DAE) ou déchets des entreprises** : déchets industriels et agricoles, déchets du commerce et du BTP ;

- **responsabilité élargie des producteurs (REP)** : désigne les filières de déchets dont le financement de la gestion est sous la responsabilité des metteurs en marché. Ce dispositif existe depuis 1992 et concerne 17 filières mais il doit s'étendre d'ici 2025 pour toucher 27 filières depuis la loi AGEC[5]. Suivant les filières, les déchets suivent des voies entièrement privées (par exemple les produits de l'agrofourniture ou les mobil-homes), des voies privées et publiques (la plupart des déchets produits par les ménages comme les piles, les lampes, le mobilier par exemple) ou essentiellement publiques (les emballages ménagers). Du fait de ces circuits multiples, les déchets des filières REP sont inclus soit dans les déchets ménagers et assimilés si collectés par le service public soit dans les déchets des entreprises s'ils sont repris directement dans les magasins ou produits par les entreprises elles-mêmes (huiles et pneus des garages par exemple). En 2017, ces filières collectaient 8,26 Mt pour un gisement estimé à 15,7 Mt [3].

La Banque mondiale [5] estime la production mondiale de déchets solides municipaux à 2,01 milliards de tonnes en 2016. Ils engendreraient 1,6 milliard tCO_2eq, soit 5 % des émissions globales. Mais le chiffre réel est certainement plus élevé en raison des difficultés de collecte des données et de la sous-estimation du N_2O (un des GES) produit par le traitement des eaux usées. En 2050, si rien ne change, la production de GES liés aux déchets municipaux pourrait s'élever à 2,6 milliards tCO_2eq. Plus globalement, tous secteurs confondus, la production de déchets municipaux au niveau mondial est évaluée entre 7 et 10 milliards de tonnes [6].

Au niveau national, les principales tendances de la production de déchets sont les suivantes [3] :

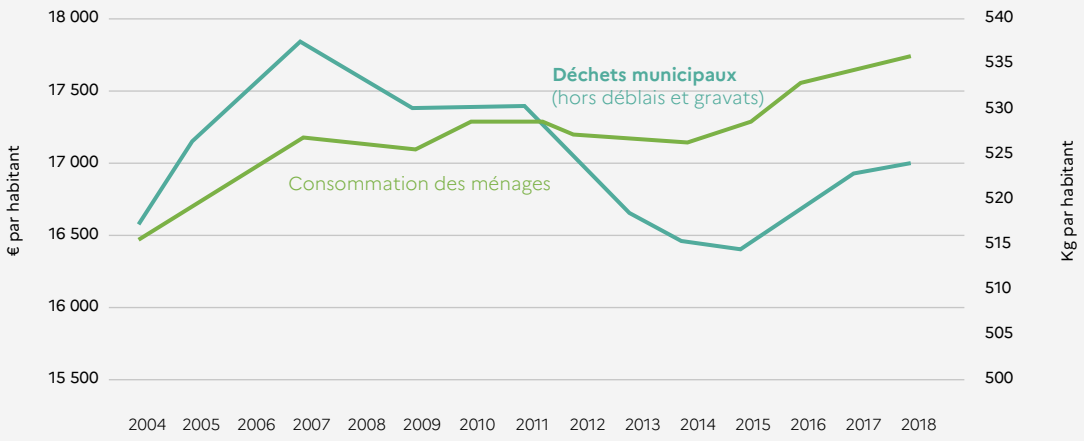
- **baisse de 10 % de la production de déchets** entre 2010 et 2016 mais (cette tendance va-t-elle se confirmer ?) ;

- depuis 2000, pour les déchets reçus dans les installations de traitement d'ordures ménagères (ITOM), **augmentation des quantités valorisées** (triées, méthanisées ou compostées, valorisées sous une forme énergétique), **quasi-stagnation des quantités incinérées** et **diminution des quantités stockées**.

Concernant la consommation des ménages, après une baisse marquée entre 2007 et 2015 liée à la crise de 2008, la production de déchets municipaux par habitant (hors déblais et gravats) suit une tendance à la hausse, corrélée au niveau de consommation des ménages [3] *(Graphique 1)*. Entre 2010 et 2018, la baisse des déchets municipaux est de 1,3 %, loin de l'objectif de 10 % fixé pour 2020.

5 Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire.

Graphique 1 Relation entre la production de déchets municipaux et la consommation des ménages

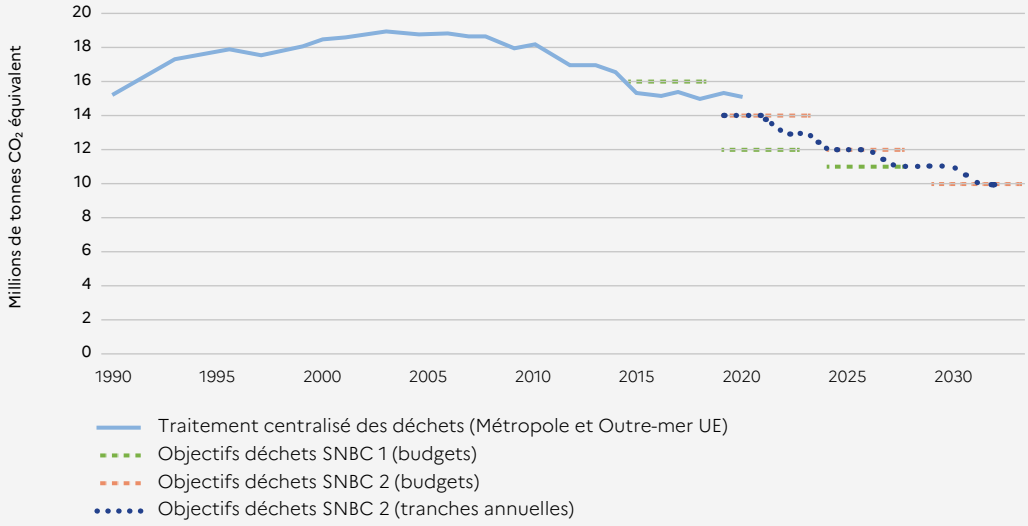


La production de déchets en général suit l'évolution du PIB avec la baisse du ratio de 178 à 145 kt/MdEUR-PIB entre 2010 et 2016 liée à la baisse d'activité du secteur du bâtiment. Hors le secteur du BTP, et malgré le recul de l'activité industrielle, la production d'un million d'euros de PIB génère toujours sensiblement la même quantité de déchets que dix ans plus tôt. Ceci s'explique par une amélioration de la collecte des déchets minéraux et par un quasi-équilibre entre la hausse des déchets des industries chimiques et la baisse des déchets des industries manufacturières.

La part des émissions de GES du secteur du traitement centralisé des déchets [7] par rapport au total national reste relativement constante entre 1990 et 2019, de 2,8 % à 3,6 % selon les années, mais elle varie considérablement suivant les GES : 1 % pour le CO_2 et jusqu'à 27 % pour le CH_4. Le CH_4 représentant plus de 80 % des émissions de CO_2eq du secteur, la courbe des émissions en CO_2eq suit celle du CH_4, cette dernière diminuant depuis 2005 avec la diminution des quantités enfouies et une meilleure captation du méthane. À l'inverse, on observe un doublement des émissions liées au traitement biologique (compostage notamment, mais leur valeur absolue reste faible en comparaison des émissions du stockage). L'objectif de la SNBC sur le secteur des déchets est de baisser les émissions de 35 % à l'horizon 2030 et de 66 % en 2050 par rapport à 2015 *(Graphique 2)*.

La production d'énergie électrique ou thermique utilisant les déchets reste modeste par rapport à la demande mais progresse depuis 2006 du fait de l'augmentation des tonnages incinérés avec récupération d'énergie et l'amélioration du captage et de la valorisation du méthane dans les centres de stockage de déchets non dangereux.

Graphique 2 Évolution des émissions de GES du traitement centralisé de déchets et objectifs de la SNBC



Source : [3].

3. Description de l'état actuel

RÉGLEMENTATION, MODES DE CONSOMMATION ET DONNÉES ÉCONOMIQUES TRANSFORMENT EN PROFONDEUR LE SECTEUR

Le secteur des déchets est actuellement en pleine transformation sous l'effet de trois facteurs principaux : la réglementation européenne et nationale, les pratiques de consommation des entreprises et des ménages et les conditions économiques.

Concernant la réglementation européenne, le plan d'action pour une économie circulaire [8] de 2020, qui s'inscrit clairement dans l'objectif de neutralité carbone à 2050, prévoit la modification du droit européen sur plusieurs segments avec l'objectif d'une moindre production de déchets à la conception, des déchets moins dangereux, des biens plus durables pour limiter le remplacement et des déchets facilement recyclables ou valorisables. Les principales dispositions concourent à :

- **limiter l'achat d'objets** au profit de l'usage et du service par l'économie de la fonctionnalité et de la coopération ;
- **prolonger la durée de vie des objets** pour retarder la production de déchets *via* la réparabilité, la lutte contre l'obsolescence programmée, la restriction des usages uniques ;
- **limiter la production de déchets en interdisant la destruction de marchandises durables invendues** ;
- **faciliter le recyclage** par des obligations sur les teneurs en matières recyclées ou par une fiscalité adaptée, la possibilité de refabrication et de recyclage de qualité ;
- **réduire l'empreinte carbone** et environnementale.

Les orientations politiques et la réglementation française, notamment la loi sur la transition énergétique et la croissance verte (LTECV)[6] de 2015, la Feuille de route économie circulaire (FREC)[7] de 2018, la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC) de 2020 et la loi Climat et résilience de 2021[8] ont également introduit des obligations[9] avec les mêmes objectifs que la réglementation européenne, voire plus contraignante, par exemple sur les plastiques ou la limitation du stockage en enfouissement. Parmi les dispositions les plus impactantes, se trouvent celles sur :

- **les produits et emballages à usage unique en plastique**, avec des interdictions de mises sur le marché ou des objectifs de recyclage ;
- **la prolongation de la durée de vie des objets** avec la lutte contre l'obsolescence programmée, l'obligation de mise à disposition de pièces détachées issues du recyclage ou encore l'indice de réparabilité et l'indice de durabilité ;
- des objectifs de **réduction de la production de déchets managers et assimilés (DMA)**, du gaspillage alimentaire sur toute la chaîne de valeur, des dépôts en centre de stockage ou de valorisation des déchets du BTP ;
- l'extension de **filières à Responsabilité Élargie du Producteur (REP)** qui vont modifier les flux de déchets (passage d'une collecte publique à des circuits privés en totalité ou en partie suivant les filières) et qui devraient favoriser l'écoconception et la recyclabilité ;
- dans les entreprises, **l'obligation de collecte séparée et de valorisation de sept flux de déchets** – papier/carton, métal, plastique, verre, bois et granulat/plâtre – depuis 2016 est en voie de généralisation et devrait accroître la part des déchets dirigés vers les centres de tri et de recyclage ;
- **l'interdiction de destruction des invendus** non alimentaires, qui devrait à la fois améliorer la gestion des stocks et diminuer la quantité de déchets à traiter au profit du marché de seconde main et du recyclage, notamment dans la filière textile ;
- **la prévention de la production de biodéchets** au travers de la lutte contre le gaspillage alimentaire, autant chez les ménages que dans la chaîne de valeur, avec un objectif de 50 % de baisse entre 2015 et 2025.

Enfin, ces réglementations nationales sont appuyées par des outils de planification qui peuvent être nationaux (Programme National de Prévention des Déchets,

6 Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.
7 Feuille de route pour l'économie circulaire du 23 avril 2018.
8 Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.
9 Pour plus de précisions, voir https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire-1.

Plan National de Gestion des Déchets), régionaux (Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets intégré au Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires, opposable aux personnes morales de droit public et à leurs concessionnaires) ou locaux (Programmes locaux de prévention des déchets).

La consommation est également en train d'évoluer et influe sur la demande de biens, sur la production de déchets et sur leur valorisation. Ainsi, **le développement de la seconde main** *via* des dons aux associations ou recycleries, de la revente entre particuliers, du développement de magasins ou espaces de ventes spécialisés prend de l'ampleur. Ce développement participerait à la diminution de la quantité de déchets mais aucune étude ne le démontre. À l'inverse, dans certains cas, c'est une façon de faire de la place dans les logements pour acheter du neuf, donc consommer de nouveau et produire de nouveaux déchets à terme. Des mouvements encore très minoritaires comme « Rien de neuf » proposent d'éviter cet effet rebond.

Cette évolution est également portée par les acteurs de la grande distribution mais ne concerne que des volumes très faibles. Des espaces « Seconde main » sont désormais dédiés aux produits textiles ou à l'électroménager dans certains magasins de grande distribution (Système U, Carrefour, Auchan, Leclerc) ou dans les marketplaces tels que La Redoute par exemple.

Ce marché de seconde main se développe également dans le milieu professionnel. Dans le bâtiment en particulier, depuis juillet 2021, le diagnostic déchets est devenu le diagnostic Produits-Matériaux-Déchets pour des réhabilitations significatives. C'est particulièrement le cas pour les bureaux, avec de plus en plus de propositions de réemploi ou de réutilisation de produits et matériaux, soit *via* une plateforme, soit par négociation directe entre entreprises. La SNCF pratique également ce système avec ses matériels, ainsi que certaines entreprises lors de déménagements ou réaménagements de bureaux, avec ou sans intermédiaires.

L'échange, la location ou encore l'économie de la fonctionnalité et de la coopération ont pour conséquences de diminuer la demande de produits et donc la production de déchets de fabrication, de rendre les produits plus durables et de réduire la production de déchets finaux. Ces pratiques se développent quasi exclusivement chez les particuliers et pas ou très peu dans les entreprises.

L'achat en vrac se développe également, mais les impacts sur la quantité de déchets, tout au long de la chaîne de valeur, ne sont pas encore connus.

À l'inverse, d'autres phénomènes peuvent générer des déchets. C'est le cas de **l'achat en ligne** qui, outre les impacts potentiels énergétiques et de pollution liés à la livraison (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilité des voyageurs et transport de marchandises*), produit beaucoup de déchets d'emballages, à la fois dans les entreprises et chez les particuliers : calage, rembourrage, protection, emballage extérieur. La crise de la Covid-19 a évidemment accentué ce phénomène, sans que l'on sache si la demande va rester au niveau atteint pendant la crise, augmenter ou diminuer. Cela étant, le mouvement de fond, apparu avant la crise, devrait perdurer.

Enfin, la société française semble entamer une timide évolution vers une prise de conscience de la **sobriété matérielle** au moins dans les enquêtes d'opinion. Les dernières enquêtes montrent que près d'un Français sur deux (48 %) déclare « consommer moins » [9] et 50 % déclarent limiter leurs achats de produits neufs [10]. Cependant cette aspiration peine à se traduire en actes, à l'exception de mouvements militants encore minoritaires ou effets conjecturels [11].

Concernant les conditions économiques, les cours du pétrole et leur volatilité (qui affectent principalement les plastiques) tout comme ceux des métaux impactent fortement **l'intérêt économique du recyclage** par rapport à l'utilisation des matières premières vierges (MPV) (*cf.* *section 1* de ce chapitre). La facilité ou, au contraire, la difficulté d'exporter des déchets à l'étranger a également un impact sur les quantités disponibles au niveau national. Enfin, le coût des différentes filières oriente la gestion des déchets. C'est particulièrement le cas pour les centres de stockage dont les obligations règlementaires successives depuis de nombreuses années ont renchéri le prix, de même que les évolutions de la Taxe générale sur les activités polluantes déchets, qui incite à privilégier les filières amont de recyclage.

En conclusion, des mouvements actuels génèrent plutôt une moindre production de déchets, des déchets moins dangereux et mieux valorisés ; mais d'autres pratiques peuvent avoir l'effet inverse, notamment sur le volume de déchets produits.

4. Méthode d'élaboration des scénarios

La méthodologie de construction des scénarios a suivi deux grandes étapes : d'une part, l'écriture des récits et, d'autre part, la modélisation. Elles ont été menées par itération, afin d'assurer la cohérence des histoires et ordres de grandeur, mais aussi la cohérence avec les autres secteurs (industrie, bâtiment, mix énergétique).

L'écriture de récits a permis de décrire la manière dont chaque scénario se traduisait sur les aspects spécifiques aux déchets, en particulier par rapport aux objectifs règlementaires, à certaines fractions amenées à évoluer, aux évolutions de consommation, de pratiques de gestion des déchets ou de prévention.

Les scénarios explorent, à des degrés divers, les leviers d'action de transition. Le *Tableau 1* synthétise la manière dont chaque scénario se positionne.

Tableau 1 Intensité des leviers d'action explorés dans chaque scénario pour les déchets

	TEND	S1	S2	S3	S4
Efforts de prévention	+	++++	+++	+	-
Développement collecte séparée	++	++++	++++	+++	++
Production déchets industriels	-	- - -	- -	+	++
Technologies de recyclage	+	=	+	+++	++
Demande en CSR	+	+	++	++++	+++
Demande plastiques	++	- -	-	+	++
Demande en énergie locale (issue des UIOM)	+	++++	+++	++	+
Déchets vers le stockage	-	- - -	- - - -	- - - -	- -

Le présent exercice de prospective a été l'occasion de créer un outil de modélisation de la gestion des déchets permettant à la fois de travailler sur les actions propres aux déchets mais également de faire le lien avec les besoins des autres secteurs (cas des plastiques en particulier et de la production d'énergie ou d'émission de GES).

L'orientation dans les différentes filières a été définie en fonction de la philosophie de chaque scénario et en cohérence avec les autres secteurs.

PRÉCISION DE VOCABULAIRE

Déchets d'activités économiques (DAE) ou déchets des entreprises : normalement ce terme recouvre déchets industriels et agricoles, déchets du commerce et du BTP, qu'ils soient dangereux, non dangereux ou inertes. Mais comme nous avons exclu dans cet exercice les déchets dangereux, les déchets de l'agriculture et des TP, le terme déchets des entreprises dans ce document doit être pris avec ce périmètre restreint.

Déchets : déchets pris en compte de façon générale dans cet exercice *(Tableau 2)*.

Par simplification, le terme incinération comprendra de fait la récupération d'énergie et sera assimilé à celui d'usine d'incinération d'ordures ménagères ou UIOM.

PÉRIMÈTRE DE TRAVAIL

Compte tenu des délais impartis, **tous les paramètres influant sur la prévention des déchets n'ont pas été pris en compte individuellement**, mais considérés comme un ensemble global. Il a cependant été considéré dans tous les scénarios qu'il n'y avait plus d'emballages plastiques à usage unique en 2040.

Pour les mêmes raisons de délais, **les déchets produits par les collectivités** (déchets de marchés et voirie) n'ont pas été pris en compte.

La production et la gestion des déchets de l'agriculture ainsi que les boues de stations d'épuration ont été modélisées par les équipes qui ont travaillé sur la prospective agriculture et alimentation et **ne se retrouvent donc pas dans ce chapitre** (*cf.* chapitres *2.1.4. Alimentation* et *2.2.1. Production agricole*). De même pour la méthanisation des biodéchets municipaux *(2.3.1. Mix gaz)*.

Les pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) des déchets incinérés et des CSR n'ont pas été modifiés dans la mesure où l'imprécision de la composition finale des déchets et CSR en 2030 et 2050 en fonction des scénarios rendait l'exercice peu robuste. En revanche, la production de GES des centres de stockage tient compte de la quantité de biodéchets enfouis.

Enfin, **la statistique sur les déchets est un exercice complexe et qui comprend des marges d'incertitude fortes** compte tenu du manque de précision des sources de données et des redressements statistiques nécessaires entre les différentes sources qui, parfois, ne portent pas sur la même année. Il a donc été très difficile de recaler exactement les sources détaillées de données avec les chiffres publiés, mais les écarts ne sont préjudiciables ni à l'intérêt des résultats, ni à la comparaison avec l'année 2015.

Au total, sur les 323 000 kt produites en 2015 en France, les quantités de déchets prises en compte dans cet exercice sont les suivants *(Tableau 2)*.

Par manque de connaissances, l'impact du changement climatique sur les déchets n'a pas pu être pris en compte notamment sur la production de déchets verts, les habitudes de consommation (par exemple volume et composition des vêtements, consommation de boissons) ou encore les déchets occasionnels liés aux catastrophes naturelles (quantités, possibilité de tri/valorisation, stockage).

DÉCHETS DU BÂTIMENT ET DES FILIÈRES REP

Le tonnage des **déchets du bâtiment** est évalué à 42 millions de tonnes en 2015, provenant à 51 % de la démolition des bâtiments, à 36 % de la rénovation et à 15 % de la construction neuve. Mais ces chiffres manquent de précision notamment pour la rénovation dont les données sont peu fiables et la production de déchets associée encore moins.

En l'absence de références fiables, la projection du volume de déchets au mètre carré construit est considérée comme stable par type d'activité (démolition, rénovation, construction neuve). La composition des déchets est également considérée comme stable.

En revanche, la part de réemploi/réutilisation dans la démolition évaluée à 1 % en 2015 a fait l'objet d'hypothèses d'évolution en fonction des scénarios.

Dans cet exercice, **les déchets des filières REP n'ont pas été expressément étudiés** car le modèle utilisé n'entrait pas dans ce détail. Par ailleurs, il aurait été nécessaire de faire un travail spécifique avec l'ensemble des filières, ce qui n'a pas pu être réalisé pour des questions d'horizon de temps car les objectifs, fixés par l'État, sont de court terme (3 à 5 ans) et pas sur une période aussi longue. Seuls les objectifs de la filière REP pour les déchets du bâtiment, à savoir le taux de recyclage des déchets non dangereux non inertes (valorisation matière) et de valorisation globale (matière et énergétique) à l'horizon 2028, ont été pris en compte.

Tableau 2 Comparaison des chiffres officiels de production des déchets et du périmètre de la prospective

	2015 Publications	2015 Pris en compte
Déchets ménagers et assimilés*	38 900 kt	30 672 kt
Déchets d'entreprises hors BTP*	59 800 kt	18 400 kt
Déchets du bâtiment**	42 000 kt	42 000 kt
Déchets des travaux publics	178 100 kt	-
Déchets des collectivités	4 200 kt	-
TOTAL	323 000 kt	91 072 kt

* Déchets, chiffres clés : l'essentiel 2020.
** Étude ADEME pour filière REP, 2021.

5. Description des scénarios

5.1. Scénario tendanciel : la réglementation au cœur des évolutions

Pour le scénario tendanciel nous mettons l'accent sur certains objectifs règlementaires, nombreux dans la gestion des déchets. Concernant les plus emblématiques, les évaluations sont les suivantes :

- **réduire de 10 % les quantités de déchets ménagers et assimilés par habitant en 2020 par rapport à 2010 et de 15 % en 2030** : si l'on observait une baisse depuis 2010 liée à la crise des subprimes et à la crise économique qui s'en est suivie, la tendance commence à s'inverser depuis 2015, avec 1,3 % de baisse entre 2010 et 2018 pour un objectif de -10 % en 2020 [12]. Même si la crise de la Covid-19 a dû accentuer provisoirement cette baisse, il paraît irréaliste de penser que l'objectif fixé pour 2020 a été atteint.

  En revanche, il paraît possible d'atteindre l'objectif 2030 en tenant compte à la fois d'une augmentation de la consommation et de baisses liées à la mise en œuvre de mesures de toutes natures telles que l'indice de réparabilité, le développement de la seconde main, la sensibilisation ou encore une diminution des biodéchets. Pour les apports en déchèteries, le développement des filières REP, en particulier sur les déchets du bâtiment, réduirait les apports de 10 % par rapport à 2015 ;

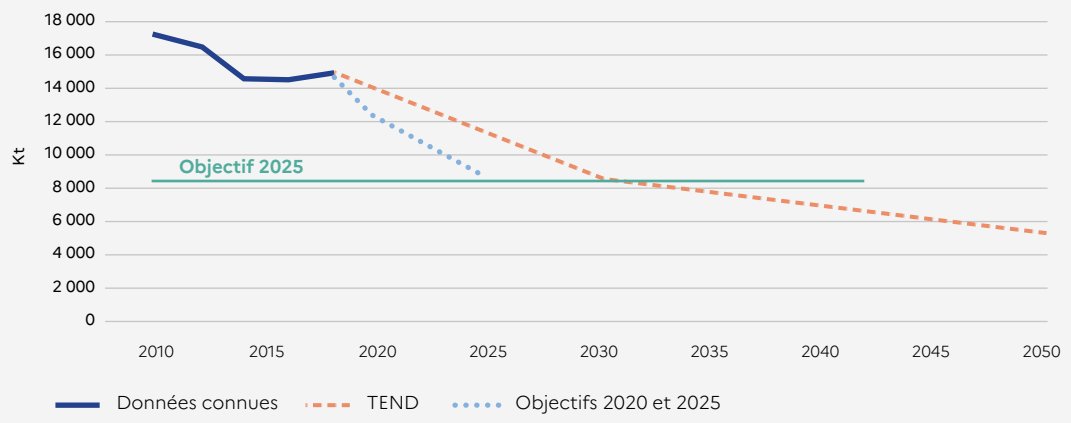
- **réduire le gaspillage alimentaire de 50 % d'ici 2025 (2030 pour certains acteurs), par rapport à 2015, dans la consommation, la production, la transformation, la distribution alimentaire, la restauration collective et commerciale**. Concernant les déchets ménagers et assimilés, le mouvement de réduction du gaspillage alimentaire est très lent. L'objectif 2025 ne semble donc pas pouvoir être atteint. Même en 2030, la prévention des déchets putrescibles (y compris, donc, le compostage domestique) est estimée à 40 %. En revanche, on estime que la réduction des déchets issus de l'alimentation sera de 70 % en 2050. Concernant les biodéchets des entreprises, les évolutions sont calées en cohérence avec les évolutions du secteur agroalimentaire, ce qui aboutit à une baisse de 25 % en 2030 et 38 % en 2050 ;

- **valoriser 100 % des déchets putrescibles ménagers et non ménagers au 1er janvier 2024** : concernant les ménages, cet objectif ne sera pas atteint car il est difficile de considérer qu'il ne restera pas quelques déchets putrescibles résiduels dans les poubelles grises ;

- **interdiction des emballages alimentaires à usage unique à compter de 2040** : cet objectif est considéré comme atteint ;

- **réduire les quantités admises en installations de stockage de déchets non dangereux et non inertes (ISDND) de 30 % entre 2010 et 2020 et de 50 % en 2025** : alors que les tonnages ont remonté entre 2016 et 2018, la tendance est globalement à la baisse depuis 2010 mais reste insuffisante pour atteindre les objectifs 2020 (12 Mt) et 2025 (8 Mt), un objectif qui pourrait n'être atteint que vers 2030 *(Graphique 3)*. La tendance va cependant à la diminution de la production de déchets et à l'augmentation de la valorisation, ce qui diminue le recours au stockage.

Graphique 3 Évolution des tonnages en centre de stockage de déchets municipaux dans le scénario tendanciel



5.2. Scénario 1: une consommation frugale

5.2.1. Quand la réglementation rencontre les aspirations des consommateurs

L'enjeu de ce scénario est de réussir une évolution rapide et d'ampleur des modes de vie. Il implique un alignement rapide de la société sur la contrainte environnementale dans des délais très courts. C'est celui qui mixe de fortes contraintes règlementaires sur la consommation et les déchets et un mouvement volontaire vers la sobriété, afin de baisser au maximum les pressions sur l'environnement.

Il se caractérise par une forte contraction de la demande de produits, donc de la demande en ressources naturelles, à la fois en valeur absolue et par substitution de matières premières de recyclage (MPR) issues du recyclage.

La société cherche à **minimiser la quantité de déchets** par habitant et par point de PIB et à recycler le plus possible les déchets résiduels, mais sans excès technologique ce qui entraîne des taux de refus en centre de tri identique au scénario tendanciel *(Graphique 4)*. Elle cherche également à simplifier le plus possible la composition des matières entrant dans la fabrication des produits et donc des déchets. Les **circuits courts** permettent également de limiter les déchets liés aux chaînes logistiques longues.

La baisse de la demande n'exclut pas la modernité, à la fois par l'innovation technologique mais aussi organisationnelle. Ce n'est donc pas le « no tech », mais **la technologie de pointe est réservée à des secteurs particuliers** (santé, sécurité…).

5.2.2. Des ménages en quête de sobriété

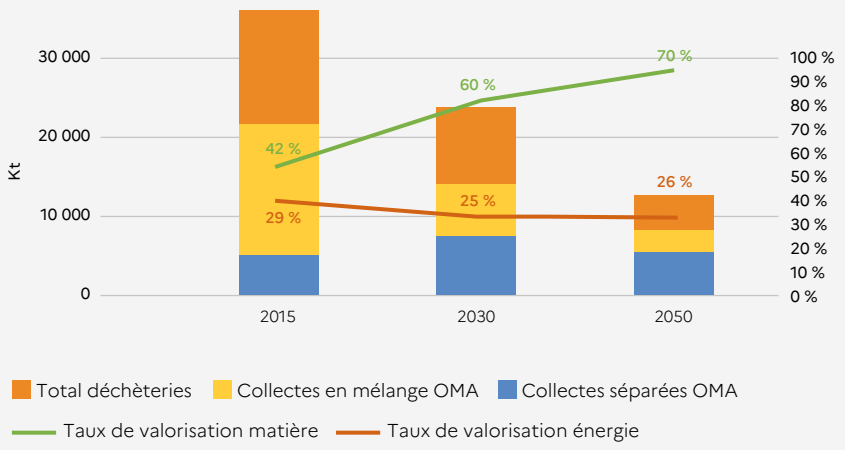
Les consommateurs changent radicalement de comportements. Les pratiques sont tournées vers la sobriété : limitation des gaspillages sur toute la chaîne de valeur, achats de produits et de services exclusivement recentrés sur la réponse aux besoins jugés nécessaires et limitation des achats de « suréquipement ». Les achats s'orientent en priorité vers des produits écoconçus, remanufacturés.

L'économie du partage et l'économie de la fonctionnalité et de la coopération dominent, avec très peu de possession directe. Les achats font l'objet d'un choix éclairé grâce notamment à **l'affichage des impacts environnementaux** et aux **indices de réparabilité et de durabilité**. La collecte des déchets est facilitée par **le tri à la source** obligatoire et par **la logistique inversée**[10] systématisée entre transport de marchandises/reprise de déchets recyclables triés issus de livraisons.

Le vrac est largement utilisé, ce qui entraîne une très forte réduction des emballages jetables et ceux qui sont utilisés sont réemployés jusqu'à l'usure.

Les plastiques pétrosourcés sont strictement réduits aux **usages règlementés** et pour lesquels il n'existe aucune alternative de suppression ou de substitution présentant des bénéfices environnementaux ou de santé. Pour ces usages, ces plastiques sont largement recyclés, par voie mécanique majoritairement, la voie chimique étant considérée comme peu intéressante sur les plans énergétiques et environnemental.

Graphique 4 Évolution des quantités de DMA (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S1[11]



10 *Reverse logistics* en anglais, qui consiste en la gestion et l'optimisation, par le biais de pratiques et de processus, des flux provenant du consommateur en direction de son fournisseur.

11 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage + méthanisation + TMB) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CSR.

5.2.3. Les entreprises se convertissent au commerce responsable

Les entreprises industrielles s'adaptent à la demande des consommateurs et modifient leur propre consommation : les quantités mises sur le marché baissent fortement (en particulier dans le secteur du ciment et des plastiques) (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). **Le nombre de références diminue, ainsi que la quantité de déchets qui par ailleurs sont moins complexes et donc plus valorisables.** C'est moins le cas pour les commerces de proximité qui profitent de la diminution du e-commerce et pour lesquels on n'observe qu'une faible diminution de la quantité de déchets malgré les efforts déployés *(Graphique 5)*. Un effet de rebond apparaît sur certaines matières, telles que le papier et le carton, qui remplacent en partie le plastique pour l'emballage. Ces déchets sont néanmoins recyclés avec un taux d'incorporation de MPR de 85 %.

L'écoconception généralisée permet de traquer la moindre économie sur le cycle de vie, **la sobriété** et les habitudes de consommation permettant de faire l'essentiel du chemin. Les entreprises proposent toutes les solutions de l'économie circulaire, de façon à limiter la demande en ressources et la production de déchets : produits écolabéllisés, affichage environnemental, solidité, réemploi, remanufacturage… Le taux moyen d'intégration des MPR dans l'industrie est de 70 %.

Les marchés de **la réparation** (par des acteurs locaux, avec des pièces détachées disponibles 20 ans) et de **la seconde main sont répandus** partout car, tant qu'un bien peut servir, il doit rester en usage, sauf si ses impacts environnementaux sont jugés trop importants au regard de ceux du couple fin de vie/achat d'un neuf. De même, on observe une forte réduction du gaspillage (hors papiers/cartons) sur toute la chaîne d'approvisionnement (chutes de production, invendus, etc.), à commencer par le gaspillage alimentaire.

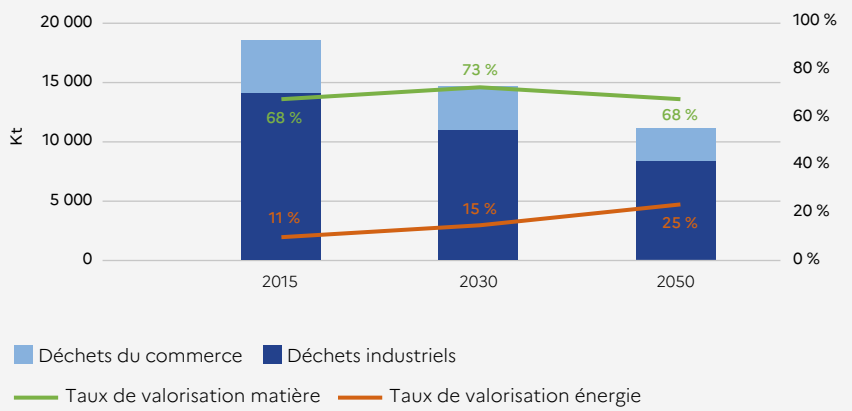
5.2.4. Déchets du bâtiment

Dans la mesure où il y a **peu de constructions neuves** dans ce scénario, le volume de déchets du secteur baisse (+/- 37 Mt en 2030 et 2050 contre 42 Mt en 2015). De même, la démolition est limitée pour favoriser la **reconversion des bâtiments** (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*).

Compte tenu des limitations importantes de prélèvements de matériaux de construction vierges, les déchets inertes sont triés sur les chantiers et valorisés au maximum dans la limite des intérêts environnementaux : 45 % en 2030 et 2050 au lieu de 33 % en 2015 (hors remblaiement de carrière). Il en est de même pour certains matériaux industriels comme le verre plat. Le réemploi augmente légèrement, passant de 1 % en 2015 à 5 % en 2030 et 10 % en 2050.

Le taux de recyclage des déchets non dangereux non inertes (valorisation matière) et de valorisation globale (matière et énergétique) double et monte à 30 % conformément aux objectifs de la filière REP démarrée en 2022.

Graphique 5 Évolution des quantités de DAE hors bâtiment (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S1[12]



12 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CSR.

5.2.5. Traitement et stockage

Sur le périmètre d'étude, la prévention des déchets est à son maximum, le gisement traité diminue donc fortement, passant de 91 Mt en 2015 à 77 Mt en 2030 et 58 Mt en 2050, pour l'essentiel grâce à la baisse de consommation et aux efforts produits sur toute la chaîne de valeur[13] *(Graphique 6)*.

Le recyclage après centre de tri se développe *via* des mesures coercitives et sans excès technologiques, afin de capter les gisements les plus faciles (certains métaux et inertes) ou les matériaux les plus problématiques.

Les autres déchets (bois, papiers, ferrailles, non ferreux) qui ne nécessitent pas de technologies sophistiquées sont valorisés à leur maximum. Tout ce qui ne peut pas être recyclé est valorisé énergétiquement par application de la hiérarchie des principes de gestion des déchets et pour contribuer à l'atteinte de la neutralité carbone, ce qui permet de réduire le stockage à 1 Mt en 2050.

Les installations de traitement mécano-biologique (TMB) ont disparu dès 2030. Les quantités en compostage industriel diminuent suite à la baisse du gaspillage alimentaire et l'augmentation du compostage de proximité. Le recours à l'incinération diminue également de 60 % entre 2015 et 2050 et le stockage (déchets municipaux et déchets inertes) de 85 % durant la même période. **Le taux de valorisation global atteint 93 %.**

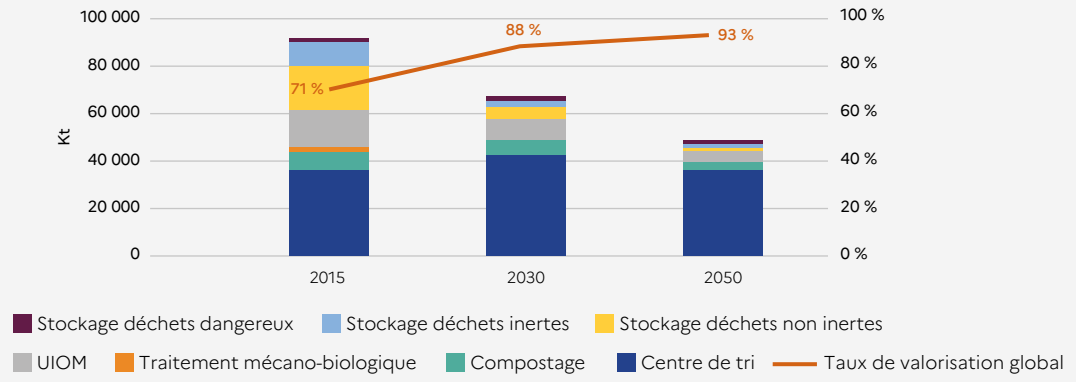
5.2.6. Énergie et GES

L'énergie produite avec les CSR en 2030 l'est uniquement dans l'industrie (1,5 Mt de CSR) dont un tiers environ pour les cimenteries et le reste en vapeur. Entre 2030 et 2050, la fabrication de biocarburants de deuxième génération (2G) consomme également des CSR : 2,6 Mt CSR sur 4,1 Mt produites, le reste étant pour l'industrie *(Graphique 7)*.

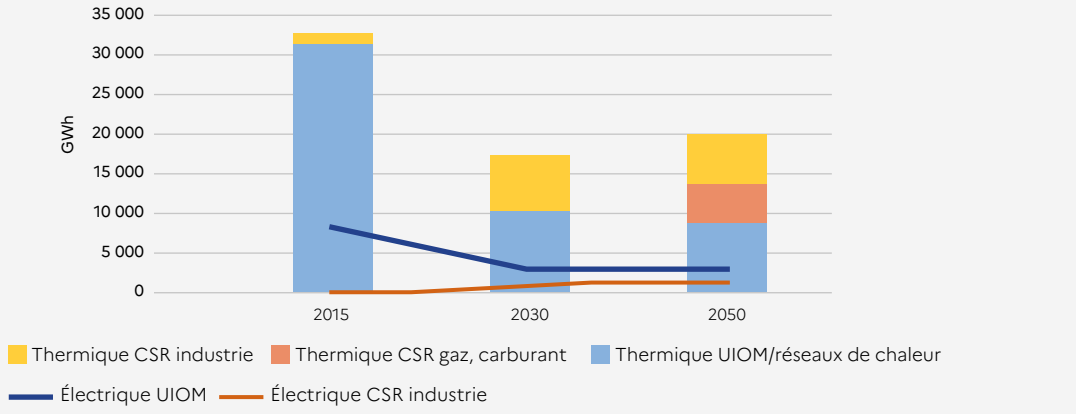
Concernant l'incinération des déchets en mélange alimentant des réseaux de chaleur, la demande chute fortement en 2030 et 2050 et donc la production d'énergie thermique et électrique baisse également autour de 10 TWh en 2030 et 2050 contre 30 TWh en 2015, soit 50 % de la chaleur produite par les déchets.

Les émissions des GES liées aux déchets diminuent de 66 % dès 2030 (4 075 $ktCO_2eq$) avec une forte baisse sur le stockage, puis se stabilisent jusqu'à 2050 (4 280 $ktCO_2eq$), l'incinération des CSR remplaçant en grande partie la quasi-disparition des GES liés au stockage.

Graphique 6 Quantités de déchets dans les exutoires (échelle de gauche) et taux de valorisation (échelle de droite) dans S1



Graphique 7 Production d'énergie électrique et thermique à partir de déchets dans S1



13 Ce chiffre comprend des doubles comptes liés aux refus de centre de tri, de compostage ou de TMB qui sont incinérés ou stockés.

5.3. Scénario 2 : sobriété et concertation locale

5.3.1. Croissance plus qualitative que quantitative

Comme dans S1, les évolutions des modes de vie sont rapides et de grande ampleur, mais avec des contraintes règlementaires moins fortes. **Ces évolutions sont donc négociées** et si la sobriété est choisie par une grande majorité de la population, elle n'est pas généralisée. La demande est appuyée par une offre dynamique (innovations technologiques et organisationnelles) pour diminuer les impacts sur l'environnement. L'opinion publique exerce une très forte pression, en particulier avec l'arrivée aux responsabilités de la génération « Greta Thunberg » (génération née autour de l'année 2000).

La croissance est plus qualitative que quantitative, avec une réindustrialisation de secteurs clés. Les marchés sont cependant fortement régulés, avec **une fiscalité environnementale forte**. La diminution de la quantité de déchets par habitant est l'un des objectifs de la société et le recyclage est très développé, mais les quantités totales à recycler baissent du fait de l'efficacité des actions de prévention comme dans S1.

Les collectivités ont plus de pouvoirs et peuvent donc plus facilement peser sur les évolutions des pratiques de consommation, soutenir des projets et favoriser les filières de tri et recyclage en mettant en relation les gestionnaires de déchets et les industriels utilisateurs de MPR.

Comme dans S1, l'objectif d'une certaine sobriété technologique n'exclut pas les avancées dans les secteurs particuliers (santé, sécurité…).

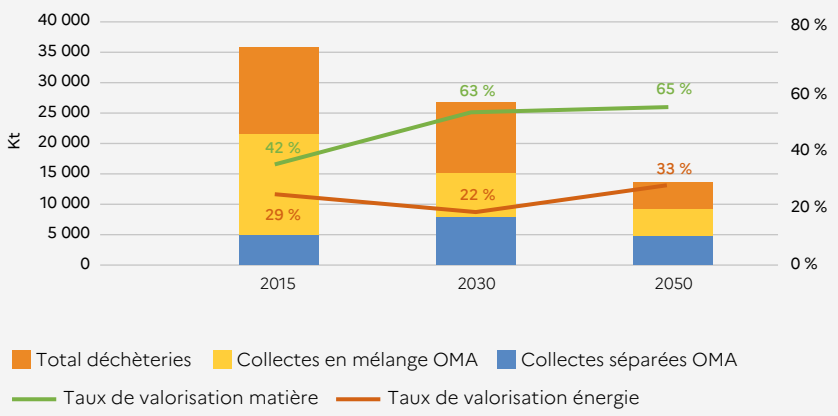
5.3.2. La sobriété en ligne de mire pour l'ensemble de la société

Les pratiques de consommation des ménages, comme celles des entreprises et des collectivités, sont majoritairement tournées vers **la sobriété** : limitation des gaspillages sur la chaîne de valeur, limitation des achats de « suréquipement », achat majoritairement de produits écoconçus ou remanufacturés, seconde main… Ces pratiques progressent en priorité sur les segments les plus rentables. L'économie de la fonctionnalité et de la coopération se développe, ainsi, plus modestement, que l'économie du partage.

Les consommateurs privilégient les produits durables moins gourmands en ressources, le développement de l'affichage environnemental et des indices de réparabilité/durabilité ayant favorisé la mise sur le marché de produits plus vertueux. Le vrac se développe, porté par **le localisme**, ce qui entraîne une forte réduction des emballages jetables avec réemploi avant recyclage. À l'inverse, le e-commerce est peu développé en raison des impacts environnementaux générés et de la priorité donnée aux commerces de proximité. L'évolution de la consommation des plastiques est globalement la même que dans S1.

La prévention des déchets, légèrement moins forte que dans S1, est néanmoins substantielle (- 62 % de déchets produits entre 2015 et 2050) *(Graphique 8)*.

Graphique 8 Évolution des quantités de DMA (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S2[14]



14 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage + méthanisation + TMB) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CSR.

5.3.3. Économie de la fonctionnalité et de la coopération et seconde main ont le vent en poupe

La sobriété étant le modèle dominant, les entreprises adaptent leur offre pour répondre à cette évolution de la demande et maintenir leur performance (chiffres d'affaires). **Les quantités de produits mis sur le marché diminuent**, mais moins qu'en S1 car la production industrielle est légèrement plus élevée (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). Face à la baisse des volumes, les entreprises diversifient leur offre : SAV, entretien/maintenance, modèle d'économie de la fonctionnalité.

Certaines références ou matériaux problématiques (plastiques en particulier et tous ceux présentant un risque sanitaire) sont ainsi évincés du marché. Les emballages en B to B (pour les entreprises) sont réduits. Mais les contraintes règlementaires étant moins fortes que dans S1, la prévention des déchets dans les entreprises est moins marquée (- 40 % en 2050 *vs* 2015 contre - 60 % dans S1) *(Graphique 9)*.

Les marchés de la réparation et de la seconde main (avec des pièces détachées disponibles 15 à 20 ans) se développent fortement, toutes les enseignes proposant directement des objets de seconde main sous leur propre marque. Tant qu'un bien peut servir, il doit rester en usage, sauf si ses impacts environnementaux et économiques sont jugés trop importants. Tout cela crée un marché et de l'emploi local.

Ces évolutions sont partagées au niveau européen, ce qui permet d'avoir des produits d'importation compatibles avec ces exigences, les autres étant fortement taxés.

En complément, des évolutions technologiques, portées par **des investissements notamment dans la R&D**, sont menées pour atteindre les objectifs de diminution de la consommation de ressources naturelles et de recyclage : écoconception, innovations dans les process de production, substitution de matières/matériaux. Le taux d'incorporation de MPR atteint 80 % (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

De même, on observe une réduction importante du gaspillage sur toute la chaîne d'approvisionnement (chutes de production, invendus, etc.) à commencer par le gaspillage alimentaire, moins marquée cependant que dans S1. **Un effet de rebond, constaté sur certaines matières (papier et le carton), est encore plus amplifié** car l'effort de sobriété est moindre.

Les quantités des principales fractions collectées en 2050 sont très proches de celles collectées en S1 mais le total des déchets produits par les entreprises augmente en raison de contraintes moins sévères (+ 25 % en 2050). Le taux de valorisation global reste néanmoins très fort (94 %).

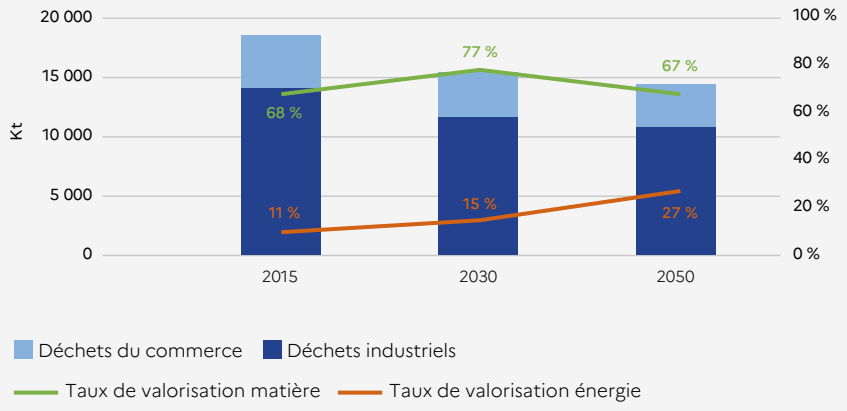
5.3.4. Déchets du bâtiment

Dans la mesure où il est prévu un volume de construction neuve d'ordre de grandeur similaire à S1 en 2050 (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*), le volume de déchets suit la même tendance.

En revanche, comme dans S1, compte tenu des limitations importantes de prélèvements de matériaux de construction vierges, **les déchets inertes sont triés sur les chantiers et valorisés au maximum dans la limite des intérêts environnementaux**. Les taux de valorisation des déchets inertes sont les mêmes qu'en S1. Il en est de même pour le taux de recyclage des déchets non dangereux non inertes (valorisation matière) et de valorisation globale (matière et énergétique).

Le réemploi augmente légèrement, passant de 1 % en 2015 à 5 % en 2030 et 10 % en 2050.

Graphique 9 Évolution des quantités de DAE hors bâtiment (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S2[15]



15 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CSR.

5.3.5. Traitement et stockage

Les grands principes d'évolution de ce scénario sont proches de ceux de S1 : forte diminution des quantités traitées par rapport à 2015, taux de recyclage important, disparition des TMB, diminution des quantités en compostage industriel. Il y a cependant quelques différences :

- **les quantités traitées sont un peu plus importantes :** ± 10 % suivant les filières (sauf le stockage qui baisse) en raison d'une production industrielle plus importante et de contraintes règlementaires moins fortes sur la prévention de déchets ;
- **la demande en CSR** en 2050 plus importante qu'en S1 (5,8 Mt contre 3,6 Mt) et celle en énergie de récupération orientent différemment le traitement des déchets, vers plus de tri (+ 25 % en S2) dont les refus alimentent la production de CSR, autant en incinération et très peu en stockage (635 kt contre 1 000 kt en S1) ;
- **un taux de valorisation global de 95 %** en 2050 contre 93 % dans S1 *(Graphique 10)*.

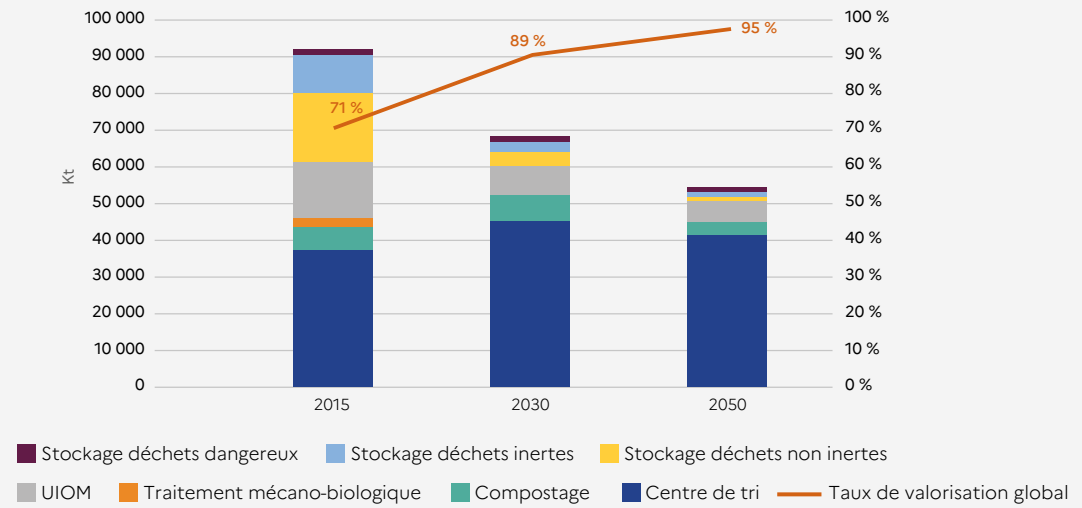
5.3.6. Énergie et GES

La production d'énergie à partir de déchets et CSR est plus importante qu'en S1 en 2030 (+ 25 %) et en 2050 (+ 50 %) dans la mesure où il y a **une demande nouvelle pour la production de gaz** en 2030 (1,6 Mt de CSR) et un peu plus forte en 2050. La demande pour les cimenteries augmente également (+ 0,2 Mt environ en 2030 et 2050). En 2030, 0,9 Mt de CSR produites ne sont pas utilisées en France et sont donc disponibles pour l'export.

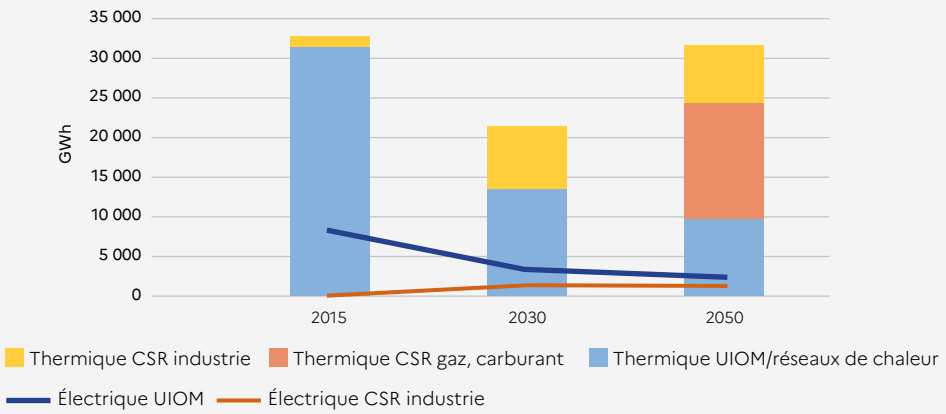
Les déchets incinérés augmentent d'environ 20 % avec **l'augmentation de la demande pour les réseaux de chaleur** mais la production d'énergie des UIOM ne représente plus qu'un tiers de la production d'énergie thermique déchets et CSR confondus *(Graphique 11)*.

Les émissions de GES liées aux déchets diminuent de 48 % dès 2030 par rapport à 2015 (6 215 ktCO_2eq) puis poursuivent cette évolution jusqu'en 2050 (5 031 ktCO_2eq), l'utilisation des CSR compensant en grande partie la quasi-disparition des GES liés au stockage des déchets.

Graphique 10 Quantités de déchets dans les exutoires (échelle de gauche) et taux de valorisation (échelle de droite) dans S2



Graphique 11 Production d'énergie électrique et thermique à partir de déchets dans S2



5.4. Scénario 3 : forte demande en énergie de récupération

5.4.1. Le règne de la croissance verte

Ce scénario est la poursuite du modèle de société de consommation (croissance verte), la neutralité carbone étant portée par l'efficacité de l'offre. L'offre pilote une consommation qui se veut responsable pour limiter les impacts environnementaux et de santé, portée par un contexte économique favorable. Les comportements évoluant peu, **la technologie est le moteur principal pour diminuer la demande en ressources naturelles** en activant les leviers de l'éco-conception et de l'intégration d'une quantité la plus importante possible de MPR.

La technologie permet également de ne pas modifier les habitudes de consommation en profondeur en dehors d'une évolution lente vers une consommation plus responsable. Des réglementations contraignent néanmoins les entreprises à limiter leurs impacts et à orienter leurs déchets en particulier vers le tri, et incitent la société à lutter contre les gaspillages alimentaires.

5.4.2. L'efficacité *via* la technologie

Les habitudes de consommation restent majoritairement portées par les achats de biens et les consommateurs misent sur la technologie pour faire l'essentiel du chemin pour diminuer les impacts environnementaux : achats de produits écoconçus issus d'une R&D très développée, de produits écolabéllisés, de **biens plus durables, entretenus même s'ils sont souvent jetés avant leur obsolescence** et remplacés par des produits plus efficients. L'économie de la fonctionnalité et de la coopération n'est adoptée que par les segments rentables en terme économique et qui ont le moins d'impacts sur les habitudes des consommateurs.

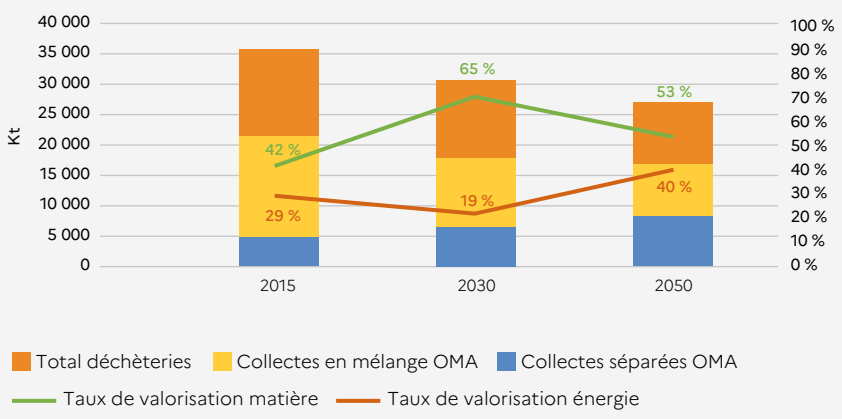
Les choix sont facilités par le développement de l'affichage environnemental et **des labels**. Les indices de réparabilité et durabilité, bien qu'assez peu mis en avant, ont quelques impacts.

Le vrac se développe sur quelques segments (notamment l'alimentaire) mais seulement pour les consommateurs qui le désirent. **Les emballages jetables restent la règle** surtout avec le développement du e-commerce et ils ne sont pas forcément réemployables/réemployés, mais recyclables et recyclés.

La lutte contre le gaspillage alimentaire, les politiques de compostage domestique et les actions sur les plastiques permettent, malgré une consommation en hausse, de diminuer la production d'ordures ménagères par habitant de -18 % en 2030 et -29 % en 2050 par rapport à 2015, contre environ -30 % et -60 % sur les mêmes périodes dans S1 et S2 *(Graphique 12)*. Même mouvement concernant les apports en déchèteries (-10 % en 2030 et -20 % en 2050 *vs* 2015) grâce aux filières REP et à la prévention sur les déchets verts. De fait, si la diminution de la quantité de déchets ménagers et assimilés suit la même pente que celle des scénarios précédents jusqu'en 2030, elle s'amenuise nettement entre 2030 et 2050.

Enfin, **la valorisation énergétique *via* la demande de CSR prime sur la valorisation matière en 2050** (*cf. section 5.4.6*).

Graphique 12 Évolution des quantités de DMA (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S3[16]



16 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage + méthanisation + TMB) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CSR.

5.4.3. Les services s'invitent dans une offre renouvelée

Les entreprises misent essentiellement sur **la technologie pour réduire les impacts** de leurs produits à la fabrication, à l'usage et à la fin de vie : R&D, éco-conception, substitution de matériaux, produits écolabéllisés, durabilité, démantèlement, recyclabilité. La hauteur de la marche à franchir pour atteindre les objectifs implique de **mettre sur le marché des biens nouveaux moins impactants et donc d'inciter à la disparition d'anciennes références**, en particulier celles consommant beaucoup de ressources (électronique, EnR individuelles, véhicules électriques notamment). L'activité de l'industrie en France est en baisse (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*), alors que les quantités de biens mis sur le marché en France, mais fabriqués ailleurs en Europe, ne diminuent pas. Seules quelques références et certains matériaux, notamment plastiques, sont retirés du marché et parfois remplacés par des matériaux biosourcés (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*).

Les solutions de services se développent pour compléter l'atteinte des objectifs, mais sur certains segments seulement. La réparation, le remanufacturage, l'économie du partage et le marché de seconde main se développent lentement en l'absence d'incitations règlementaires fortes, d'intérêt économique (prix de l'énergie élevé mais supportable) et de prise de conscience collective forte. Les métiers évoluent, essentiellement dans le recyclage, et l'emploi se développe dans la R&D.

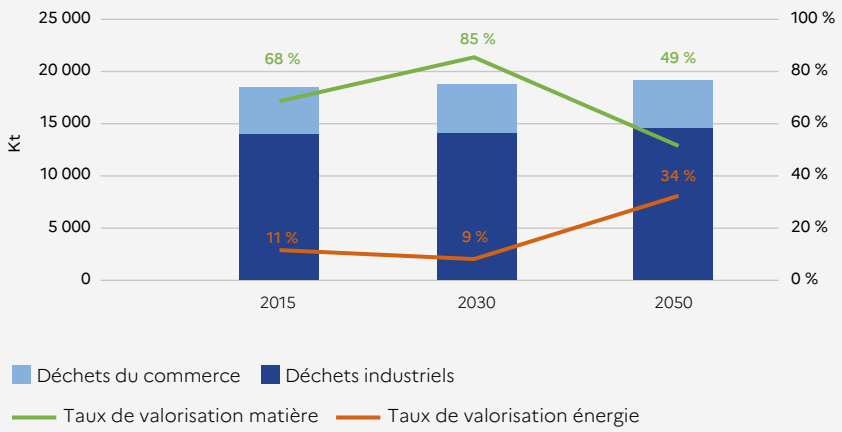
Malgré les progrès technologiques, la production de déchets des entreprises reste au même niveau qu'en 2015 (+ 1 % en 2030 et + 4 % en 2030) notamment en ce qui concerne les biodéchets, le bois, les papiers/cartons et les métaux et leur valorisation matière et énergétique est bien développée *(Graphique 13)*. **À noter cependant entre 2030 et 2050 la priorité donnée à la valorisation énergétique aux dépens de la valorisation matière contrairement à la hiérarchie de la gestion des déchets pour répondre à la demande très forte d'énergie de récupération et en particulier de CSR** (*cf. section 5.4.6*).

Le taux moyen d'incorporation de MPR est de 60 % (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). Les déchets du commerce sont au même niveau qu'en 2015, les obligations concourant à la baisse des volumes, notamment sur les invendus, étant compensées par la croissance de la consommation et donc la production de déchets.

5.4.4. Déchets du bâtiment

Dans la mesure où il y a plus de démolitions et constructions neuves liées à une dynamique type haussmannien (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*), **la production de déchets de chantiers augmente fortement** : environ 61 Mt en 2030 et 2050 contre 42 Mt en 2015 avec augmentation des quantités recyclées (17 Mt environ en 2050 contre 10 Mt en 2015). Augmentation du taux de réutilisation sur chantier également : 10 % en 2030 et 2050 contre 5 % en 2015.

Graphique 13 Évolution des quantités de DAE hors bâtiment (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S3[17]



17 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CS.

5.4.5. Traitement et stockage

L'élément central du traitement des déchets dans ce scénario est lié à **la demande énergétique très forte** qui nécessite de mobiliser toutes les sources d'énergie renouvelable et de récupération dont les CSR à des niveaux très élevés : 2,8 Mt en 2030 et surtout 18 Mt en 2050. À noter que par rapport à S1 et S2, il n'y a pas de demande de CSR pour les carburants mais uniquement pour le gaz et l'industrie (dont ± 2 Mt pour les cimenteries, soit environ 3 fois plus que dans S1 et S2).

Pour répondre à ces besoins, les sources mobilisables sont détaillées dans le *Tableau 3*. En 2030, le surplus pourra être exporté ou répondre à des besoins non couverts. En 2050, une partie des flux de déchets qui était triée en vue du recyclage est utilisée pour des CSR : 6,5 Mt de déchets d'entreprises et 5 Mt de DMA.

1 Mt de **CSR est importée** pour combler le déficit, la production française étant à son maximum. Par ailleurs **40 % des flux de déchets d'activités économiques (DAE) pour le recyclage sont détournés pour les CSR** (10 Mt en 2030 contre 6 Mt en 2050). L'incinération et le stockage pour les déchets d'entreprises disparaissent presque totalement *(Graphique 14)*.

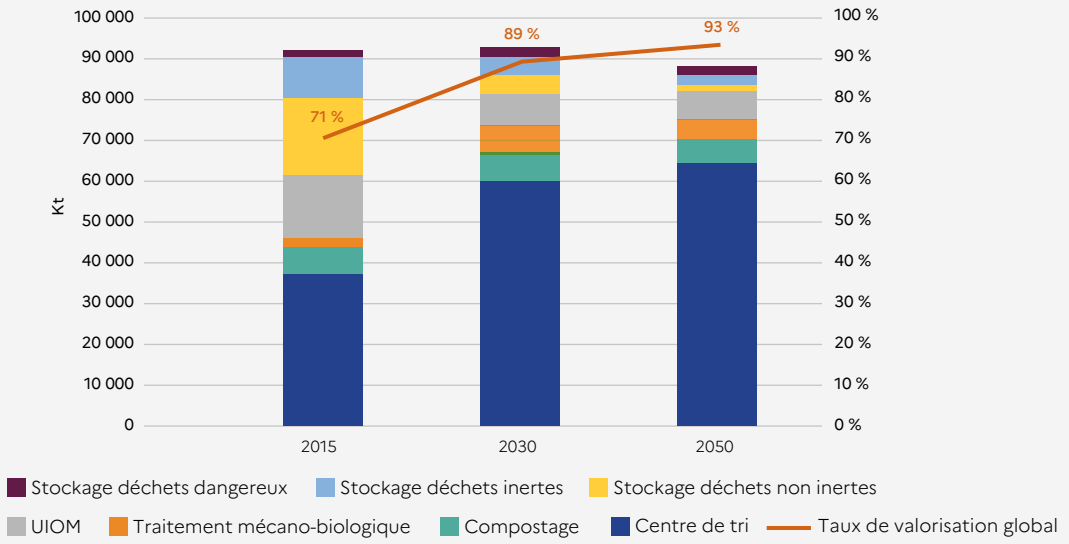
Le TMB est développé car les technologies permettent une séparation et un traitement efficaces. Aussi, cela compense le manque d'effort de séparation des fractions à la source. L'incinération, qui ne concerne plus que les DMA, reçoit 3 fois moins de déchets qu'en 2015.

Tableau 3 Détail des besoins en CSR et des sources dans S3

Besoins en CSR	2030 (Mt)	2050 (Mt)
Production gaz hors métha.	0	14,92
Production pour l'industrie	2,83	3,25
Total	2,83	18,16
Sources de CSR	**2030 (Mt)**	**2050 (Mt)**
Centres de tri de OMA	0	3,21
Traitement mécano-biologique	0,83	0,48
Tri des apports déchèteries	0,33	1,83
Centres de tri DAE	2,34	9,83
Refus tri BTP/RBA* et imports	0	2,50
Total	3,50	17,86

* Refus de broyage automobile.

Graphique 14 Quantités de déchets dans les exutoires (échelle de gauche) et taux de valorisation (échelle de droite) dans S3



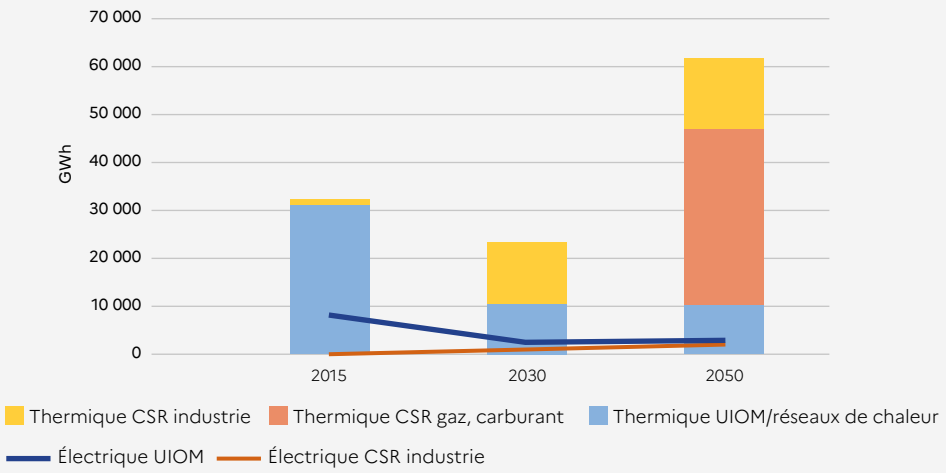
5.4.6. Énergie et GES

La production d'énergie à partir de déchets double en 2030 et 2050 par rapport à S2 *(Graphique 15)* liée à l'utilisation des CSR, en particulier pour le gaz (pas d'utilisation de CSR pour les carburants) *(Tableau 3)*. Elle augmente de 1 Mt en 2030 et 1,5 Mt en 2050 notamment pour les cimentiers qui absorbent environ le double de CSR que dans S2, soit 1,2 Mt en 2030 et 1,5 Mt en 2050.

La demande de déchets pour les réseaux de chaleur augmente en 2050 par rapport à S2 mais la chaleur des UIOM ne représente plus que 15 % de la chaleur des déchets et des CSR (10 TWh sur 62 TWh).

Les émissions des GES liées aux déchets diminuent de 47 % en 2030 (6 252 ktCO_2eq) mais augmentent jusqu'en 2050 (9 064 ktCO_2eq) avec la consommation de CSR, pour atteindre un niveau inférieur de - 24 % à celui de 2015.

Graphique 15 Production d'énergie électrique et thermique à partir de déchets dans S3



5.5. Scénario 4 : une production de déchets proche de 2015

5.5.1. L'offre soutient la poursuite de la croissance

C'est l'offre qui pilote l'économie face à une demande qui évolue peu : peu de limite sur les usages, faible incitation aux changements de modes de vie et de consommations. La croissance est soutenue par une très forte demande de matières premières vierges et de recyclage. Cela implique de **maximiser le recyclage et de sortir du marché les produits les moins performants pour les remplacer par des nouveaux, plus économes en ressources**. Mais ce ne sera pas suffisant.

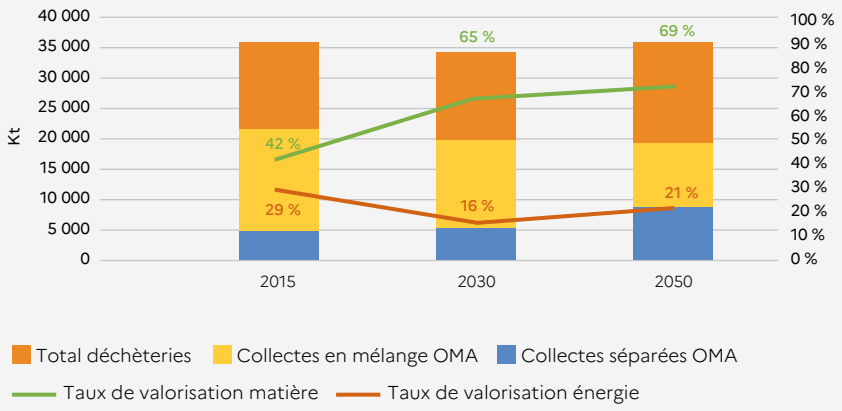
5.5.2. Croissance de la consommation… et des déchets

Les ménages et les entreprises maintiennent une consommation élevée, avec des achats de produits en quantité (« suréquipement ») ou des objets vite changés. **Le prix bas reste le critère principal de choix, sans souci de qualité intrinsèque, du lieu de production ou de son impact environnemental.** L'économie de la fonctionnalité et de la coopération est marginale et utilisée seulement si elle ne modifie pas trop les habitudes. L'affichage environnemental et les indices de réparabilité et de durabilité sont peu développés et peu utilisés.

Le vrac se développe auprès d'une minorité de consommateurs sensibles au sujet. Les emballages jetables hors plastique sont la règle, pas forcément réemployables, mais recyclables et recyclés. Les emballages plastiques à usage unique ont disparu en 2040. Le pétrole étant très cher au niveau national et européen, une grande partie des plastiques pétrosourcés sont aussi fabriqués à partir de déchets plastiques pyrolysés, de bionaphta, ainsi que d'algues et de bactéries. Pour le reste, le chemin est fait uniquement par les innovations technologiques : l'éco-conception, la substitution et le captage et stockage de carbone. La suppression concerne uniquement des usages trop coûteux pour le marché de masse.

Avec peu de contraintes, on constate **une augmentation de la consommation et de la production de déchets à l'exception des déchets putrescibles**, sujet qui fait l'objet d'une politique active et qui permet de limiter cette progression. Les apports en déchèteries sont constants, une partie des flux supplémentaires étant absorbée par les filières REP. De fait, la production de DMA reste constante et identique à 2015 *(Graphique 16)*.

Graphique 16 Évolution des quantités de DMA (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S4[18]



18 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage + méthanisation + TMB) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CSR.

5.5.3. Une intense activité économique génère un accroissement des déchets

Au-delà de la compétitivité internationale, le prix élevé des métaux et de l'énergie fossile, les difficultés d'approvisionnement, la rareté des matériaux de construction et la pression des ONG font peser des contraintes sur les entreprises. Les segments technologiques sont mobilisés pour dynamiser le renouvellement de gammes : produits écolabéllisés, démantèlement, recyclabilité, obsolescence marketing pour faire tourner la machine. Le taux moyen d'incorporation de MPR est de 45 % (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). **Des produits à moindre impact sont fréquemment mis sur le marché**, ce qui entraîne la disparition des anciennes références *via* des incitations ou des obligations.

Les solutions de service se développent mais restent plus un marché de niche pour une partie des consommateurs qu'un levier de diminution de consommation de ressources. La réparation, le remanufacturage, l'économie du partage et le marché de seconde main trouvent un marché limité mais intéressant pour les entreprises. **Ces évolutions sont partagées au niveau mondial**, avec un commerce international très développé.

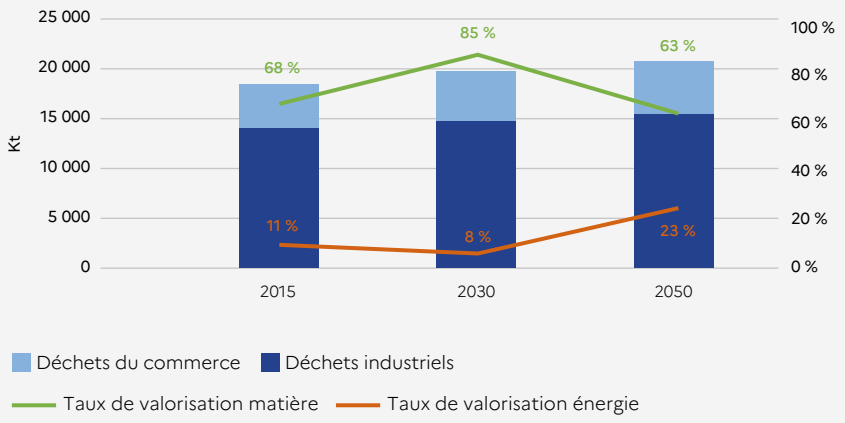
Une activité économique en croissance associée à peu de contraintes entraîne **une légère augmentation de la production de déchets dans l'industrie et le commerce** (+ 10 % en 2050 pour les déchets industriels et + 20 % pour les déchets du commerce) *(Graphique 17)*.

L'évolution des fractions de déchets industriels en hausse ne suit pas la production industrielle en baisse sur le territoire national car délocalisée (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*). Les anciens sites et équipements industriels sont démantelés, ce qui engendre des déchets de métaux (+ 33 % en 2050 par rapport à 2015). Le commerce international, en forte croissance aussi, s'accompagne de **l'augmentation du volume de déchets de papiers et cartons** (+ 23 % en 2050 par rapport à 2015) malgré un fort développement du numérique.

5.5.4. Déchets du bâtiment

L'évolution des déchets du bâtiment suit le même rythme que dans le scénario tendanciel avec une production de déchets de 40 Mt environ en 2030 et 2050. Le rythme de réemploi est le même que dans les autres scénarios ainsi que l'atteinte des objectifs de la filière REP.

Graphique 17 Évolution des quantités de DAE hors bâtiment (échelle gauche) et des taux de valorisation (échelle droite) dans S4[19]



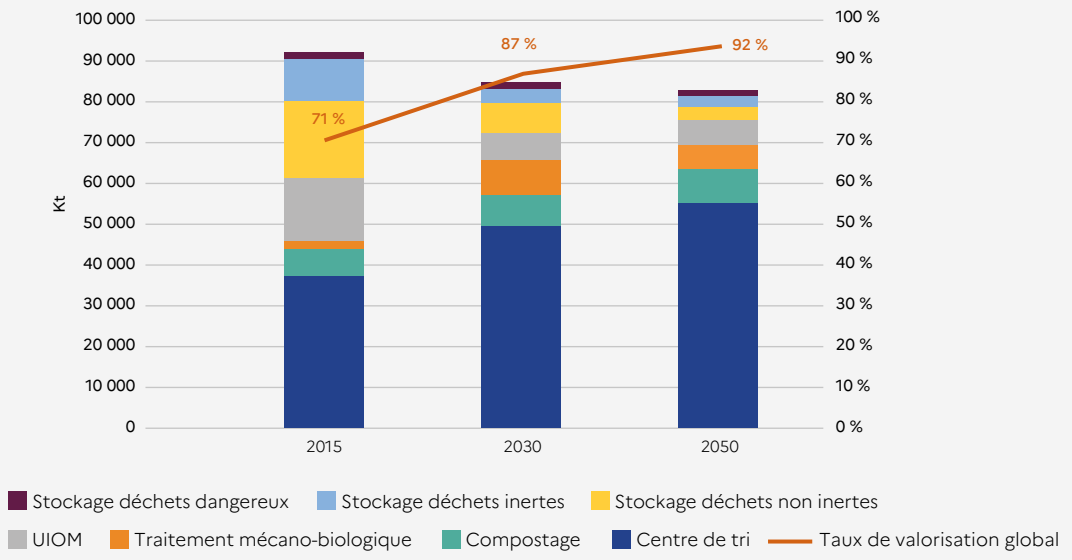
19 Taux de valorisation matière = entrées (en centres de tri + compostage) - CSR et Taux de valorisation énergétique = entrées en UIOM + CSR.

5.5.5. Traitement et stockage

La différence principale avec S3 est une demande en CSR beaucoup moins forte en 2050 (10 Mt contre 18 Mt dans S3) en raison **d'une moindre demande pour la production de gaz et de chaleur industrielle.** Les autres caractéristiques sont les suivantes *(Graphique 18)* :

- **les quantités traitées sont quasi identiques à 2015** en raison des effets compensatoires entre des efforts de prévention et une augmentation de la production ;
- **le TMB augmente en 2030 puis diminue en 2050** en raison d'une baisse importante de déchets putrescibles collectés en mélange ;
- **le compostage industriel** reste à peu près au même niveau qu'en 2015 compte tenu de la forte production de déchets putrescibles par l'industrie et le commerce ;
- **des quantités stockées** plus importantes en 2050 que dans S3 (3,2 Mt dans S4 contre 1,5 Mt en S3).

Fraphique 18 Quantités de déchets dans les exutoires (échelle de gauche) et taux de valorisation (échelle de droite) dans S4



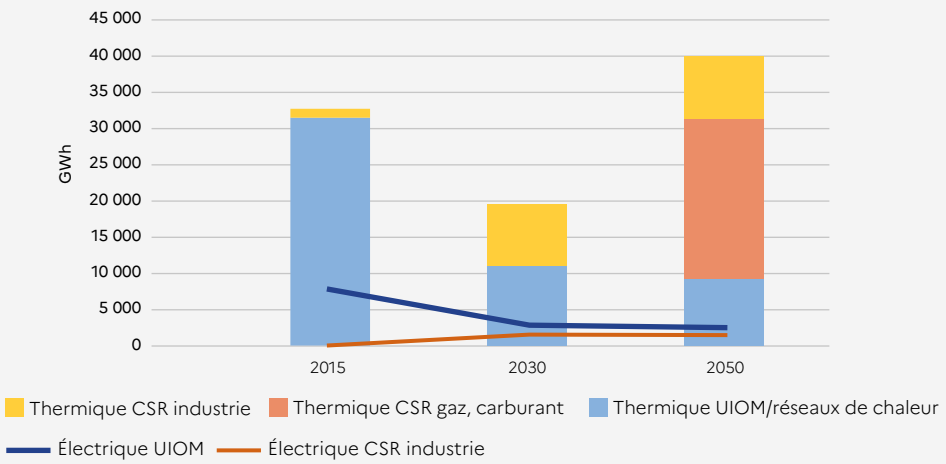
5.5.6. Énergie et GES

Forte baisse de la demande en CSR pour le gaz par rapport à S3 (- 6 Mt en 2050) et baisse également pour les cimentiers (environ 1 Mt utilisées en 2030 et 2050 contre environ 2 Mt dans S3).

De fait, la production d'énergie thermique de déchets et de CSR baisse de 20 TWh, l'essentiel étant généré par le gaz (pas de demande pour les carburants) *(Graphique 19)*.

Les émissions de GES liées aux déchets sont légèrement plus faibles qu'en S3 et de 40 % inférieures à celles de 2015. Cette diminution de 40% reste stable entre 2030 et 2050.

Graphique 19 Production d'énergie électrique et thermique à partir de déchets dans S4



5.6. Comparaison des scénarios sur quelques paramètres

Pour la production pour le traitement des déchets, les principales hypothèses sont les suivantes (les pourcentages indiquent la variation entre 2015 et 2050) :

Tableau 4 Principales hypothèses retenues pour la production de déchets en 2050

Déchets	TEND	S1	S2	S3	S4
Ordures Ménagères Résiduelles (OMR)	- 15 % du volume par rapport à 2015	- 50 % ↘↘ Réduction de la consommation et du gaspillage • Obligation de collecte séparée	- 45 % ↘ Réduction de la consommation et du gaspillage • Obligation de collecte séparée	- 8 % ↗↗ Peu de contraintes sur la consommation ni sur les déchets mais effet des règlements et incitations existantes	+ 1 % ↗ Augmentation des tonnages • Bonne couverture de la collecte séparée • Compostage domestique développé
Déchèteries/ encombrants	- 30 % du volume par rapport à 2015	- 70 % ↘↘ Réduction de la consommation et du gaspillage • Obligation de collecte séparée • Développement des REP	- 70 % ↘ Réduction de la consommation et du gaspillage • Obligation de collecte séparée • Fort développement REP	- 30 % ↗ Augmentation liée à la croissance et à une consommation peu contrainte mais effet des REP qui détourne du gisement des déchèteries	+ 15 % ↗↗ Augmentation liée à la croissance, à une consommation non contrainte et moindre effort des entreprises
Déchets d'Activité Économique (DAE)	- 4 % du volume par rapport à 2015	- 40 % ↘↘ Réduction de la consommation et du gaspillage • Obligation de collecte séparée	- 23 % ↘ Réduction de la consommation et du gaspillage • Obligation de collecte séparée	+ 5 % ↗ Peu de contrainte sur la consommation et sur les déchets, donc croissance de la production	+ 11 % ↗ ↗Augmentation des tonnages ↘ Bonne couverture de la collecte séparée

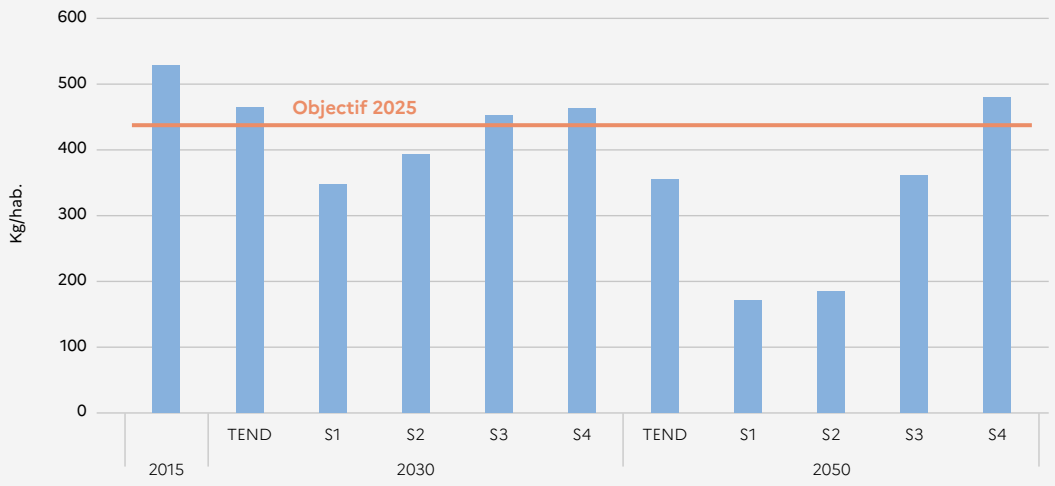
Tableau 5 Principales hypothèses retenues pour le traitement des déchets en 2050

Filières	TEND	S1	S2	S3	S4
Centres de stockage non dangereux	- 59 %	- 95 % dont matière organique - 90%	- 99 % dont matière organique - 90%	- 94 % dont matière organique - 60%	- 79 % dont matière organique - 70%
Incinération	- 37 %	- 72 % Les flux sont réorientés largement vers le réemploi, la réparation et la valorisation matière	- 69 % Les flux sont réorientés largement vers le réemploi, la réparation et la valorisation matière	- 67 % Les flux sont largement réorientés vers la valorisation matière et la fabrication des CSR	- 71 % Les flux sont largement réorientés vers la valorisation matière et la fabrication des CSR
CSR	x 8,5	x 15,5 Les CSR permettent d'assurer l'indépendance énergétique. Ils proviennent des refus de centres de tri (DMA et DAE)	x 24 Les CSR permettent d'assurer l'indépendance énergétique avec une demande d'énergie un peu plus forte qu'en S1. Ils proviennent des refus de centres de tri (DMA et DAE)	x 70,5 Très forte demande pour la production de gaz décarboné. Le taux de valorisation matière est abaissé pour produire des CSR à partir de refus de tri de DMA et DAE mais également de refus de broyage automobile et d'importations	x 42 Le gisement des déchets très abondant permet d'avoir des refus de tri en quantité suffisante pour une demande en CSR pour compléter le mix énergétique à la marge

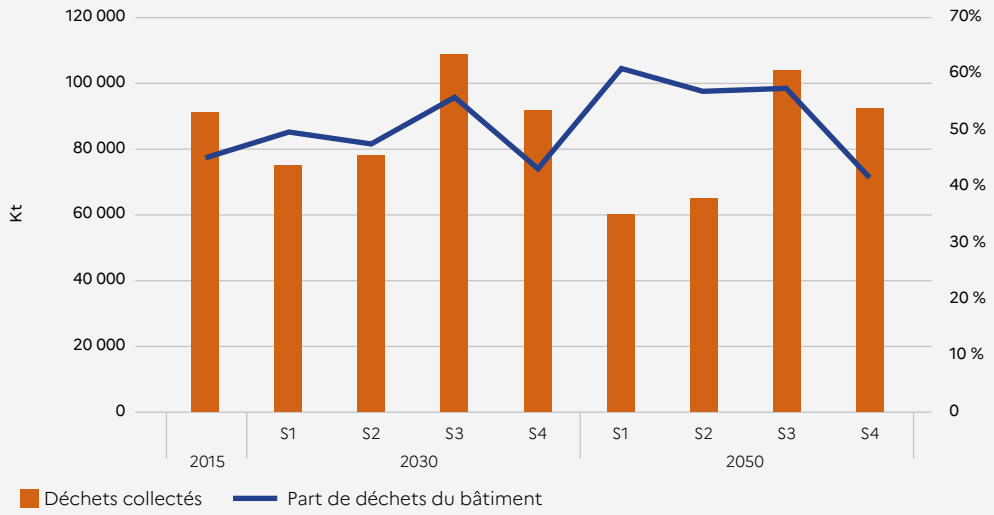
La production de déchets ménagers et assimilés par habitant évolue de façon logique en allant croissant de S1 à S4 pour les 2 périodes *(Graphique 20)*. De même, la production est moins importante en 2050 qu'en 2030, signe de la prolongation des tendances de prévention, à l'exception de S4 avec le développement de la consommation de biens et services qui engendre des déchets plus que la prévention n'en enlève. Enfin, l'objectif légal de 2025 (438 kg/hab.) est atteint dans presque tous les cas de figure sauf en S3 2030 et en S4.

Sans surprise, la quantité de déchets collectée est moindre dans S1 et S2 que dans S3 et S4 *(Graphique 21)*. Dans S1 et S2, la production est moindre en 2050 qu'en 2030 en raison de la poursuite des politiques de prévention. Dans S3, la production est plus importante que dans S4 car elle est liée à la forte production de déchets du bâtiment elle-même engendrée par le scénario « haussmannien » de la construction (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*).

Graphique 20 Évolution de la production de DMA en kg/hab. en 2030 et 2050 dans les différents scénarios



Graphique 21 Évolution de la production de déchets pris en compte dans les différents scénarios



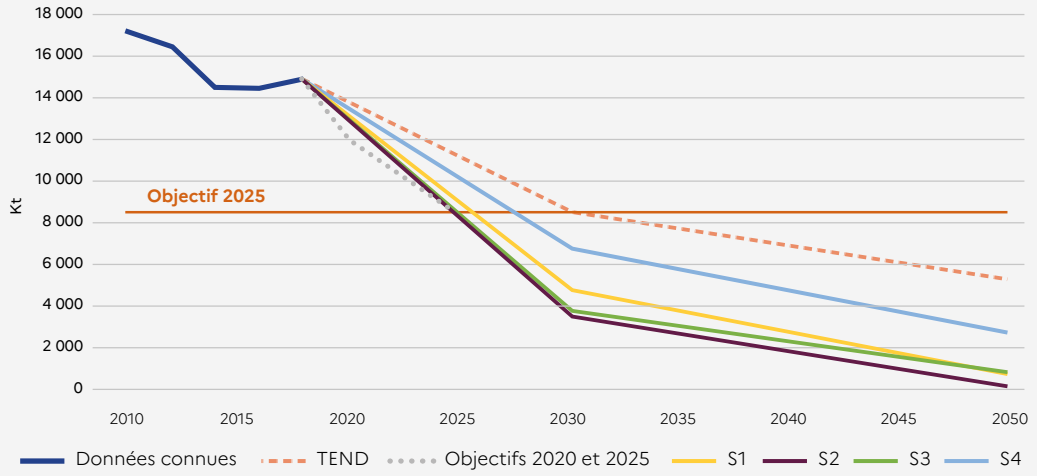
Par rapport à l'objectif de diminution des quantités entrantes en centre de stockage de déchets non dangereux *(Graphique 22)*, seuls S2 et S3 permettent d'atteindre l'objectif en 2025. Dans S2, c'est en raison de la demande plus forte de matières à recycler et dans S3, en raison de la forte demande de CSR qui concentre toutes les attentions et bouscule même la hiérarchie de gestion des déchets en privilégiant la valorisation énergétique avant la valorisation matière. Dans S1 l'atteinte se fait en 2026 et dans S4 en 2028.

Ce qui est symptomatique, c'est la réduction drastique des quantités de déchets stockés en 2050 quel que soit le scénario. Cela s'explique dans S1 et S2 par la diminution des quantités produites et par la priorité de principe donnée à la valorisation (matière et énergie) et dans S3 et S4 à la nécessité de compenser, d'une part, les besoins en énergie par des énergies non carbonées et, d'autre part, les besoins très importants en ressources par des MPR pour limiter la ponction sur les ressources naturelles.

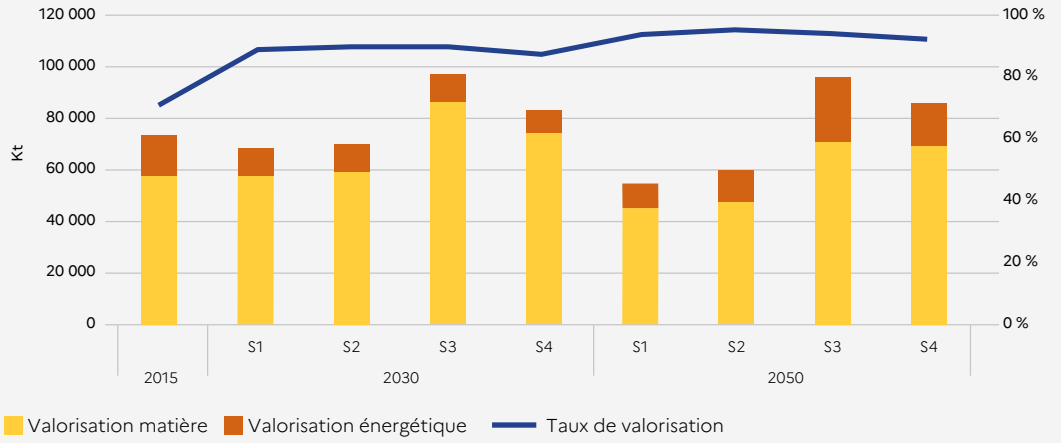
Concernant la valorisation matière et énergétique *(Graphique 23)*, on observe trois évolutions :

- le taux global de valorisation qui reste très haut dans tous les scénarios en raison soit de la philosophie générale des scénarios dans S1 et S2 (importance de réduire l'impact de l'humanité sur la nature), soit de la nécessité dans S3 et S4 d'avoir des ressources énergétiques ou matières ;
- la singularité du scénario 3 avec la très forte demande en MPR et en CSR qui fait monter les quantités valorisées ;
- l'augmentation des quantités valorisées entre S1 et S4 (à l'exception de S3) est liée à l'augmentation de la production de déchets et à la demande dans l'industrie.

Graphique 22 Évolution des tonnages en centres de stockage de déchets non dangereux[20]



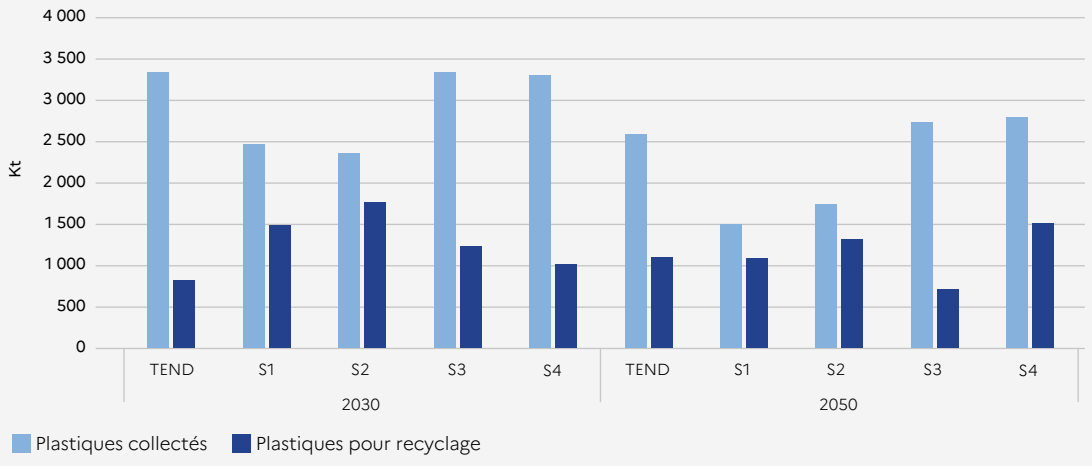
Graphique 23 Évolution de la valorisation matière et énergétique dans les différents scénarios[21]



20 Pour les cinq scénarios, seules les valeurs à 2030 et 2050 sont estimées, les valeurs intermédiaires étant définies par extrapolation linéaire.
21 Les tonnages de CSR sont inclus dans la valorisation énergétique.

Les *Graphique 24* et *Graphique 25* présentent les résultats pour les plastiques d'une part et les papiers/cartons d'autre part :

Graphique 24 Évolution des quantités de déchets plastiques collectés et triés pour recyclage dans tous les scénarios

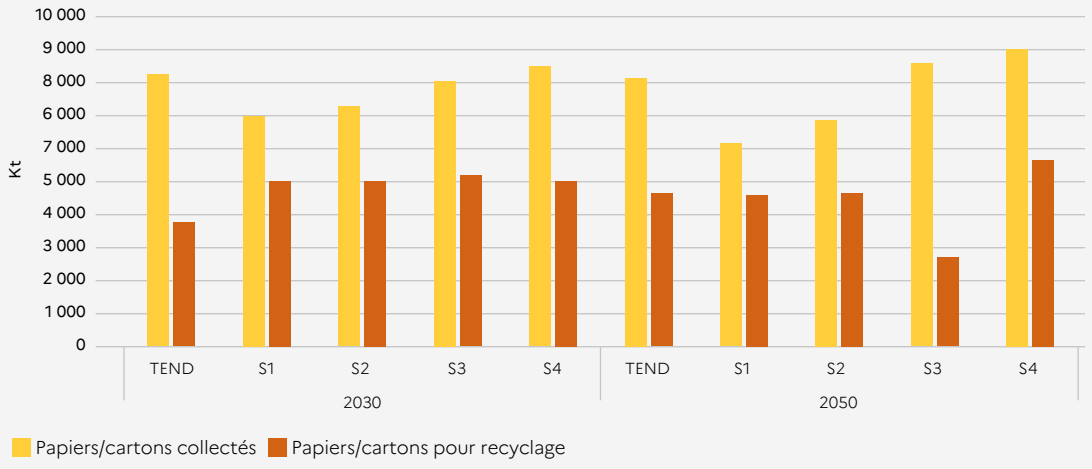


Pour **les plastiques**, leur traitement dépend de la demande de l'industrie en MPR et de la demande en CSR. C'est pour ces raisons que la quantité disponible pour recyclage est plus faible dans S3 et S4 que dans S1 et S2. À noter la présence du recyclage chimique uniquement dans S3 (environ 1 Mt en 2030 et 2050) et dans S4 (0,4 Mt en 2030 et 2,7 Mt en 2050) (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

Les papiers/cartons suivent un peu la même tendance que les plastiques (voir en particulier S3 2050) sauf que l'industrie papetière est déjà très engagée dans la valorisation de MPR et il est donc plus difficile de détourner des gisements potentiels pour les CSR (dans S3 2050, les MPR seront importés).

D'une façon générale, la demande de ressources croît avec la production industrielle. Comme les MPR ne peuvent pas compenser intégralement les ressources naturelles, il sera nécessaire d'augmenter la consommation de ces dernières. **Dans S3 et S4, il faudra donc étendre les mines existantes ou ouvrir de nouveaux sites puis explorer et exploiter de nouvelles zones** dans l'ordre des possibilités : les zones polaires et les grands fonds marins. Cela ne sera pas sans conséquence pour l'environnement de ces espaces notamment sur la biodiversité. Puis viendront peut-être les explorations et exploitations de la Lune dans la mesure où la technique et les coûts seront supportables pour une exploitation rentable.

Graphique 25 Évolution des quantités de déchets papiers/cartons collectés et triés pour recyclage dans tous les scénarios



6. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures

6.1. L'économie circulaire au cœur de la politique déchets

L'exercice de prospective montre que dans tous les scénarios, l'usage circulaire de la matière, y compris de la matière organique, est un élément central du modèle économique et de la politique de gestion des déchets :

- soit par principe dans S1 et S2 dans lesquels **la diminution de la consommation de ressources naturelles entraîne logiquement une plus faible production industrielle, assortie d'une faible production de déchets et d'un faible gisement potentiel de MPR** (baisse en valeur absolue). La recherche de matériaux de substitution, notamment de MPR, est donc un enjeu fort (hausse en valeur relative) ;

- soit par nécessité dans S3 et S4 car certaines ressources naturelles sont non renouvelables (notamment les métaux, les matériaux de construction ou industriels), chères pour certains, voire menacées par des incertitudes d'approvisionnement. L'industrie doit donc diversifier ses sources d'approvisionnement et les maîtriser le plus possible dans un monde très concurrentiel. C'est ce que permet le recyclage avec les déchets produits en France et en Europe. Cette course aux métaux et matériaux ne peut cependant pas être couverte par le seul recyclage, comme l'a montré [13]. En effet, au-delà de 1 % de croissance annuelle de la demande en métaux, le recyclage ne peut couvrir que 30 % à 50 % de la demande suivant les cas. Or, les taux de croissance restent globalement plus soutenus dans S3 et S4 que dans S1 et S2, ce qui signifie qu'il faudra aller chercher des métaux vierges dans des zones non exploitées aujourd'hui sur les divers continents, dans les régions polaires, dans les grands fonds marins et même sur la Lune. Ce qui peut poser des problèmes d'acceptation ou d'ordre technique, économique ou géopolitique concernant la répartition des ressources exploitées. Même difficulté pour les matériaux de construction (sable, graves, calcaire, argile…), qui dépendent de marchés locaux et seront en concurrence avec des zones naturelles, agricoles ou urbaines à plus ou moins long terme selon le rythme des constructions.

Le recyclage a cependant ses limites, technologiques ou économiques, qui font que tous les matériaux et matières recyclables ne sont pas collectés, ne sont pas forcément séparés ni récupérés. De plus, une partie de ces matières reste stockées dans la technosphère (bâtiments, équipements, infrastructures…). Il n'est donc pas possible de récupérer et recycler 100 % d'un matériau. D'où le recours, dans tous les scénarios, à l'incinération ou au stockage.

Cette centralité de l'usage circulaire de la matière peut toutefois s'effacer au profit de la couverture des besoins en énergie. C'est le cas dans S3, dans lequel 4 Mt de déchets sont détournés du recyclage au profit de la production de CSR, ce qui accentue le déficit de MPR et donc les incidences vues au paragraphe précédent.

Au même titre que la biomasse (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*), les déchets peuvent avoir des usages multiples qu'il faut considérer et parmi lesquels il faut arbitrer. C'est aujourd'hui le cas avec la hiérarchie de la gestion des déchets. Mais nous avons vu dans cet exercice que cette hiérarchie peut être bousculée en fonction des priorités de la société.

Autre fait symptomatique : une production de déchets qui dépend de la production industrielle et donc de la demande finale. Très clairement il apparaît que S1 et S2, dans lesquels la demande est contrainte par obligation ou par choix de société, sont aussi ceux dans lesquels moins de déchets sont produits. Il est donc indispensable d'agir autant sur la demande finale que sur les consommations intermédiaires, de façon à limiter les impacts à l'aval de la chaîne logistique.

Enfin, tous les scénarios montrent **une tension montante sur les déchets en tant que source de matière ou d'énergie**, en raison de multiples facteurs : échelle plus locale d'échanges économiques, croissance économique soutenue, raréfaction des

ressources, etc. De fait, les quantités éliminées en centre de stockage de déchets non dangereux diminuent rapidement sur la première période pour aboutir à des niveaux quasi nuls (moins de 1 Mt dans S2 et S3) ou faibles par rapport à la situation 2015 : 2 Mt dans S1 et 3 Mt en S4 *(Graphique 22)*.

Une meilleure maîtrise des flux de déchets, voire une constitution de stocks stratégiques pour les métaux les plus exposés, en anticipation des mouvements des cours de matières premières au niveau mondial, semble une voie à explorer.

6.2. Agir en priorité sur la demande finale

Le niveau de la demande finale est donc le premier facteur de limitation des déchets. Il est possible d'agir sur cette demande par des évolutions de comportement tels que :

- une chasse aux gaspillages qui ne nuit en rien au confort de vie ;
- une diminution des consommations de produits par un transfert des produits vers les services grâce à l'économie de la fonctionnalité et de la coopération. Ce développement peut se retrouver sur des segments très variés : la mobilité, les biens d'équipement (par exemple des machines à laver collectives dans les immeubles), les matériels de bricolage (location, partage) ou les matériels dans les entreprises au-delà des photocopieurs, des pneus ou des matériels pour chantiers très développés, comme l'éclairage ou les machines-outils. L'effet sur la production est lié à une moindre demande d'unités et à des matériels plus résistants (pour assurer la rentabilité du système) qui sont remplacés moins souvent (pièces ou matériel dans son entièreté) ;
- une durée de vie des objets plus longue évitant l'achat de produits neufs alors qu'ils sont encore utilisables. Cela passe par la solidité, la réparabilité, l'achat de seconde main et la résistance des consommateurs aux effets de mode ;
- la prolongation de la durée de vie par le réemploi, la réutilisation, le don ou la vente en seconde main qui limitent les effets rebond, ces derniers consistant à se délester d'un objet sans en acheter un neuf qui peut être plus consommateur de ressources naturelles que le précédent. Ces pratiques peuvent s'appliquer aussi bien aux particuliers qu'aux entreprises ou aux collectivités.

Ces évolutions sont cependant difficiles, car elles vont à l'encontre des représentations de la société dans laquelle la consommation mène au bonheur, la nouveauté est mise en avant, la possession promue comme contribuant au bonheur et à la distinction ou à l'inclusion dans un groupe. Il faut donc sortir de ces injonctions, à la fois collectivement et individuellement, ce qui nécessite évidemment un changement de paradigmes.

L'action des pouvoirs publics peut permettre de faciliter ces changements en obligeant ou aidant entreprises et particuliers à consommer moins, produire moins de déchets et orienter ces déchets vers des filières privilégiées. Plusieurs axes sont envisageables :

- les réglementations qui vont agir sur la production de biens, notamment les interdictions de matières ou matériaux qui perturbent le recyclage, les obligations sur les analyses de cycles de vie, sur l'incorporation de matières recyclées, sur la réparation ou sur l'obsolescence, le développement des labels ;
- les réglementations qui vont influer par rebond sur la consommation et donc sur la production, comme l'affichage environnemental, les obligations dans les marchés publics, la fiscalité, les contributions aux éco-organismes, l'obligation de proposer des pièces détachées issues de la récupération, les limitations des messages environnementaux dans la publicité ;
- les réglementations fixant des objectifs de production de déchets par habitant, des obligations de collectes séparées ou de valorisation accompagnées d'une **fiscalité adaptée**. Par exemple, la tarification incitative de l'enlèvement des ordures ménagères ou la défiscalisation des invendus ou la TGAP, les réglementations sur les rejets qui renforcent le coût des installations ;
- les incitations financières pour développer la R&D ou la réalisation de projets, faciliter le recyclage en période de coût bas des matières premières vierges, faire évoluer le business model vers l'économie de la fonctionnalité, soutenir les projets d'écologie industrielle et territoriale ;
- la sensibilisation des consommateurs sur les impacts environnementaux et économiques de la consommation et de la production de déchets, la promotion de l'économie de la fonctionnalité et de la coopération, de l'échange, de la seconde main, de la réparation. Pour les collectivités, l'organisation d'animations autour de ces concepts pour les rendre concrets auprès des particuliers.

6.3. La fiscalité, une voie prometteuse à explorer

Doivent également être explorées les pistes fiscales qui peuvent être des leviers intéressants ou, au contraire, destructeurs. Il y a bien sûr **la taxe carbone** qui va renchérir les biens importés, ce qui va diminuer l'écart de coût entre biens importés et biens produits en Europe et donc potentiellement faire évoluer les choix des consommateurs. Mais d'autres options sont possibles. Par exemple, l'intégration d'une **valeur du capital nature dans la comptabilité** d'une entreprise, voire d'une collectivité, est une voie de plus en plus portée au niveau international [14] [15] qui pourrait permettre d'intégrer la valeur des ressources naturelles puisées dans le sol et considérées comme gratuites. Un test auprès de 10 entreprises a été réalisé en région Provence-Alpes-Côte d'Azur par le Cabinet ComptaDurable[22] dans ce cadre, qui devrait apporter un éclairage intéressant sur les intérêts et les limites de cette approche.

La modulation de la TVA doit être également travaillée sur le modèle des écomodulations des contributions aux filières REP. Facile à poser sur le principe, moins facile à appliquer en raison de la détermination du périmètre d'un objet : qu'est-ce qu'un objet issu de l'économie circulaire ? qu'est-ce qu'un produit peu impactant sur l'environnement ? quel taux de matière issue du recyclage fixer pour une TVA plus faible ? quelle méthode de contrôle ? Autant de questions parmi d'autres, dont les réponses doivent permettre de favoriser certains produits, sans pour autant entraîner des complications excessives dans les déclarations et vérifications de TVA.

La différence de traitement entre les investissements et les dépenses d'exploitation pourrait être un autre point fiscal à étudier. Par exemple, dans les budgets des collectivités, les investissements peuvent faire l'objet de soutiens publics permettant d'en alléger le poids et le financement peut être réalisé par l'emprunt. En revanche, les dépenses de fonctionnement sont peu aidées (en dehors de la dotation globale de fonctionnement sous conditions) et ne peuvent être financées que par l'impôt. Ainsi, une collectivité qui souhaiterait passer à l'économie de fonctionnalité et de la coopération pour certains de ses équipements pourrait y trouver un désintérêt comptable.

22 https://www.compta-durable.com/comptabilite-durable/.

7. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs

Au-delà de l'outil développé pour cet exercice, il est nécessaire de disposer d'outils de prospective plus précis sur la consommation ; sur la gestion de tous les déchets avec une analyse fine des déterminants de la production de déchets ; sur le détail des technologies et leur possibilité d'évolution et sur le recyclage. L'ensemble doit également fournir des informations sur les investissements et les coûts de revient, indispensables à l'analyse des impacts économiques.

7.1. La désirabilité de la sobriété en question

Les scénarios ont l'intérêt de tracer des chemins très contrastés pour en apprécier les limites. En ce qui concerne la gestion des déchets, S1 et S2 impliquent une forte diminution de la demande, contrainte ou choisie.

Si elle est contrainte (au moins en partie), se pose la question de savoir si la population acceptera et à quelles conditions, ce qui sera vécu comme une atteinte à la liberté et une dégradation du mode de vie (même si cela permet au plus grand nombre de satisfaire ses besoins et donc de diminuer les inégalités). De même, de savoir si les entreprises accepteront ce qui sera vécu comme une récession, un risque de perte de chiffre d'affaires, un risque de cessation d'activité et de chômage même si, dans les faits, il faut penser ces scénarios comme s'inscrivant dans une autre logique de société. Et si c'est accepté, il faudra que l'évolution se fasse très vite au regard des temps habituellement nécessaires à des changements de cette ampleur.

Si elle est choisie, il faut s'interroger sur les déclencheurs de cette prise de conscience et les caractéristiques qui permettent cette efficacité. De même, les conditions de réalisation de cette sobriété ne sont pas évoquées dans cette prospective. Comme précédemment, les temps du changement sont extrêmement contraints.

Dans S3 et S4, c'est la technologie qui permet d'atteindre la neutralité carbone sans trop modifier les modes de vie. Pour autant, toute la technologie n'est pas opérationnelle en 2020. Par exemple, en 2020, 1% du recyclage des plastiques se fait par voie chimique dans des unités pilotes et des démonstrateurs, ce qui signifie que l'efficacité, la viabilité économique et les impacts environnementaux sont encore incertains.

Cette poussée à l'extrême des technologies de recyclage et de production de CSR aboutirait à une quasi-disparition des centres de stockage en 2050 dans S2 et S3, ce qui peut apparaître intéressant d'un point de vue de la gestion des déchets, mais difficile à réaliser.

7.2. Mieux connaître les impacts sur les ressources naturelles

La course à la production va également prolonger la demande exponentielle en métaux et matériaux de construction. Pour les métaux, cela va nécessiter d'ouvrir de nouvelles mines dans les zones déjà exploitées. Or, partout à travers le monde, de plus en plus d'oppositions se dressent contre ces nouveaux projets ou extensions. De plus, les mines consomment beaucoup d'eau, beaucoup d'énergie (même si les groupes miniers investissent dans l'efficacité énergétique et le développement des EnR) et offrent des conditions sociales de travail, de sécurité et de protection de l'environnement qui ne sont pas toujours du meilleur niveau. Par ailleurs, les nouveaux gisements sont souvent moins concentrés et de plus en plus éloignés des zones habitées, ce qui les rend plus difficilement rentables. Il faudra donc exploiter les zones polaires, explorer et exploiterles grands fonds marins ainsi que – potentiellement – la Lune, puis Mars, avec des conséquences environnementales significatives et une faisabilité technico-économique encore à démontrer.

Même problématique pour les matériaux de construction en France car, dans la mesure où c'est un marché local, il n'y a pas de possibilité de s'approvisionner à l'autre bout du monde, sinon à un coût prohibitif. Construire du neuf plutôt que de réhabiliter (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*), même en recyclant des déchets inertes, aboutira nécessairement à agrandir les carrières ou en ouvrir de nouvelles, y compris celles en milieu littoral.

Le chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires* chiffre les impacts sur les matériaux de construction. Par ailleurs, le feuilleton qui paraîtra en 2022 sur l'empreinte matière, ressources et biens de consommation, donnera les impacts sur 7 matières de l'ensemble des activités de production des scénarios en particulier grâce à MatMat (*cf.* chapitre *1.1. Ambitions, objectifs, méthodes*).

8. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **Circle Economy**, *The Circularity Gap Report 2020*, 2020, 69 pages.

[2] **ADEME, Frédéric Michel, José Rafael Dulbecco et Johan Lhotellier, RDC Environment**, *Évaluation environnementale et économique de l'allongement de la durée d'usage de produits de consommation ou biens d'équipements à l'échelle d'un foyer français*, Rapport, 2020, 27 pages.

[3] **ADEME**, *Déchets, chiffres clés : l'essentiel 2019,* 2020.

[4] **ADEME**, *MODECOM™ 2017 Campagne de caractérisation des déchets ménagers et assimilés*, 2020.

[5] **World Bank**, *A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, 2018.

[6] **AIE**, *Global Waste Management Outlook,* 2015.

[7] **CITEPA**, *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten,* 2021.

[8] **Commission européenne**, *Nouveau plan d'action pour une économie circulaire, pour une Europe plus propre et plus compétitive*, 2020.

[9] **ADEME**, *Les représentations sociales du changement climatique, 21e vague,* 2020.

[10] **Cécile Desaunay**, *Vers la déconsommation ?*, Constructif n° 59, p. 30-34, 2021.

[11] **CRÉDOC**, *Consommer plus sobre : une tendance que la crise de la Covid-19 pourrait amplifier. Consommation et modes de vie*, vol. n° 312, juin 2020.

[12] **ADEME**, *Déchets, chiffres clés : l'essentiel 2020*, 2021.

[13] **François Grosse**, *Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières*, Annales des Mines – Responsabilité et environnement, vol. n° 76, p. 58-63, 2014.

[14] **Partha Dasgupta**, *The Economy of Biodiversity: the Daguspa Review*, London, HM Treasury, 2021.

[15] **PNUE**, *Faire la paix avec la nature : plan directeur scientifique visant à répondre aux urgences climatiques et à lutter contre l'appauvrissement de la biodiversité et la pollution*, Nairobi, 2021.

9. Annexe : évolution des principales variables du secteur

	2015	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Déchets ménagers et assimilés collectés [kg/hab./an]	530	354,4	172,2	184,7	363,1	483
Déchets ménagers et assimilés putrescibles collectés [kg/hab./an]	-	22,2	14,1	0,9	25,5	30,1
Apports en déchèteries [kg/hab./an]	211	135,4	58	58	135,4	222,5
Taux de valorisation global des déchets ménagers et assimilés [%]	42	53	70	65	53	69
Déchets en centre de stockage de déchets non dangereux et non inertes [Mt/an]	18,4	5,8	1,1	0,6	1,5	3,2
Déchets incinérés en UIOM [Mt/an]	15,4	10,6	5,5	6	6,9	5,7
Déchets de commerces collectés [Mt/an]	4,4	4,6	2,9	3,7	4,7	5,3
Déchets industriels collectés [Mt/an]	14	13,4	8,4	10,8	14,7	15,5
Déchets du bâtiment collectés [Mt/an]	42	39,2	39,2	37,2	60,1	39,3
Déchets plastiques pour recyclage [Mt/an]	1,1	2,6	1,5	1,8	2,7	2,8
Déchets de papiers/cartons pour recyclage [Mt/an]	7,3	8,1	6,1	6,8	8,6	9
Déchets de bois pour recyclage [Mt/an]	6,4	6,3	3,9	4,7	7	7,2
Taux de valorisation matière tous déchets [%]	56	72	77	76	70	74
Taux de valorisation énergétique tous déchets [%]	15	16	16	19	24	18
Taux de valorisation global tous déchets [%]	71	88	93	95	94	92
Production de CSR [Mt/an]	0,25	2,4	4,1	6,3	17,8	10,8

2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse

1. Une ressource aux enjeux multiples
575

2. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios
587

3. La biomasse, une mobilisation et des usages variables selon les scénarios
590

4. Une mobilisation croissante de la biomasse dans tous les scénarios
603

5. Le développement de la biomasse doit être envisagé en cohérence avec tous les secteurs concernés
608

6. Références bibliographiques
612

1. Une ressource aux enjeux multiples

1.1. La biomasse, une ressource convoitée pour de multiples usages

La biomasse est produite par les organismes vivants : plantes, animaux, insectes, micro-organismes... Ses ressources sont très diverses, de même que ses usages, qui touchent à de nombreux secteurs économiques.
La biomasse est définie, en France, par l'article 19 de la loi n° 2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement comme « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers ».

La biomasse est, par conséquent, produite :

- soit **directement dans la nature**, dans le cas des végétaux et animaux ;
- soit indirectement, dans le cas des **résidus issus de matière vivante**, c'est-à-dire des déchets animaux et végétaux issus des activités humaines. Dans le cas des déchets, seule la fraction fermentescible de ces déchets est assimilée à de la biomasse.

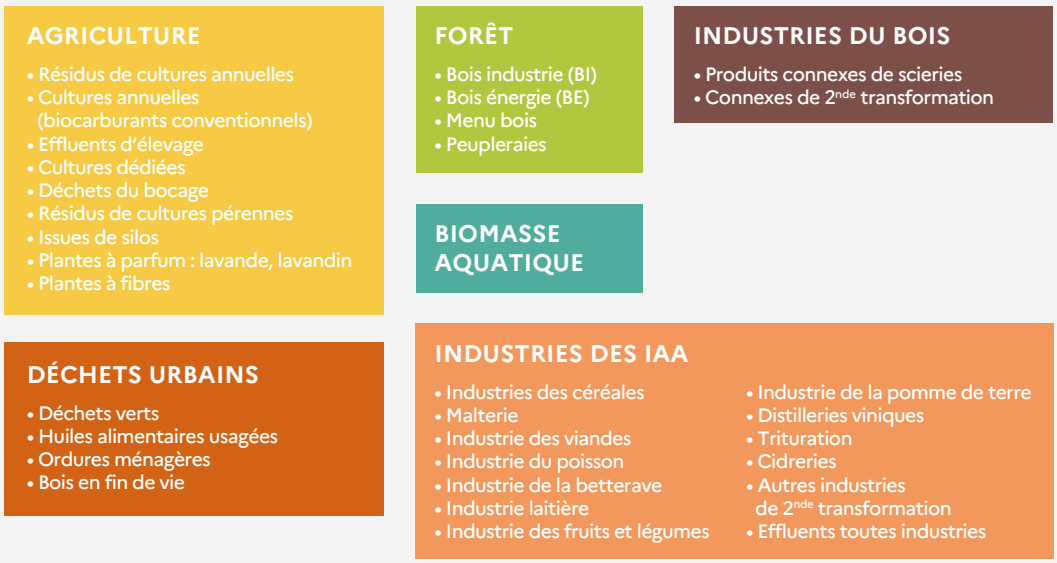
Les services rendus par la biomasse sont donc très larges et en évolution permanente. La biomasse permet de nourrir les populations, de produire des matériaux et produits biosourcés très divers (sciages, panneaux, plastiques, lubrifiants, détergents, textiles, cosmétiques...) et de produire de l'énergie (chaleur, gaz, électricité, carburants). L'essentiel de la biomasse agricole est destiné à l'alimentation humaine et animale et la biomasse forestière est principalement affectée à la production de bois d'œuvre et de « bois industrie-bois énergie ». La biomasse n'est donc pas une source d'énergie nouvelle. Le bois est utilisé comme combustible depuis des millénaires. Jusqu'au XVIIIe siècle, il a constitué la seule source d'énergie calorifique, servant à produire le charbon de bois utilisé pour le chauffage des métaux, avant la généralisation de l'emploi de la houille.

La biomasse est, en France, une ressource renouvelable compte tenue de la préservation des écosystèmes forestiers (pas de déforestation) et agricoles permettant un maintien de la production dans la durée. Néanmoins, **cette ressource reste limitée en quantité par rapport à la surface disponible**, le potentiel de production (rendement) et les limites de prélèvement permettant notamment de préserver la qualité des sols et la biodiversité. Si la biomasse est une ressource renouvelable, cette limite en quantité nous oblige à ne pas la gaspiller en optimisant et en priorisant les usages en fonction des services attendus pour la société (alimentation, substitution des ressources fossiles, stockage carbone, biodiversité, paysage...). **Une approche globale et systémique de la gestion de cette ressource est donc nécessaire** pour trouver les bons arbitrages et équilibres entre les usages potentiels en fonction des types de biomasse considérés et des milieux.

D'une manière générale, concernant la biomasse agricole, les usages alimentaires sont prioritaires par rapport aux usages non alimentaires. Le potentiel disponible pour les usages énergétiques dépend donc de l'évolution des besoins alimentaires. Concernant la biomasse forestière, l'optimisation des services environnementaux nécessite de respecter une hiérarchie des usages. En fonction de la qualité des bois, il s'agit de prioriser un usage en bois d'œuvre (permettant à la fois de prolonger le stockage de carbone après la récolte du bois en forêt et de substituer l'usage de matériaux plus émetteurs de gaz à effet de serre), en bois industrie puis en bois pour l'énergie. Dans ces scénarios prospectifs, le bois énergie est donc considéré en complément et en synergie des autres usages prioritaires.

L'Observatoire National des Ressources en Biomasse (ONRB), créé par FranceAgriMer en 2009, est un outil de suivi des ressources en biomasse. Il a pour objectif d'identifier et de quantifier les ressources disponibles et leurs emplois afin, notamment, d'anticiper d'éventuelles concurrences d'usage. Les différentes ressources suivies par l'ONRB sont représentées dans la *Figure 1*.

Figure 1 *Ressources suivies par l'ONRB*



Source : ONRB, 2020.

Les principales ressources de biomasse, mobilisables pour une valorisation matière, chimique et énergétique sont :

- **les produits issus de l'agriculture** (production végétale et animale), des opérations de récolte et de stockage ainsi que de l'entretien des parcelles et zones agricoles. Se retrouvent alors à la fois les cultures dédiées à une valorisation énergétique, les couverts végétaux ou cultures intermédiaires[1], les coproduits et résidus agricoles, l'ensemble des effluents d'élevage (fumiers, lisiers), les résidus de cultures pérennes (arboriculture, viticulture) et les matières issues de silos de stockage (céréales, maïs, oléagineux) ;

- **les ressources halieutiques** : il s'agit notamment des algues et microalgues ;

- **le bois** : la ressource bois peut provenir de la forêt ou d'espaces non forestiers, comme les vergers ou les haies. Mais il peut également s'agir de bois de récupération ou de rebut. À ce titre, les ressources issues des industries du bois (première et deuxième transformation tels les scieries, les papetiers et panneautiers) sont bien considérées ici ;

- **les coproduits générés par les industries agroalimentaires** qui correspondent à « l'ensemble des flux des industries agroalimentaires autres que ceux destinés à l'alimentation humaine en première intention (anciennes denrées alimentaires, sous-produits, sous-produits animaux, résidus, écarts de tri et de transformation…) [1] ».

Coproduits, sous-produits et déchets sont des termes communément utilisés pour désigner des productions « induites », c'est-à-dire des productions indissociables des cycles de production du ou des produits commerciaux majeurs.

Sauf mention contraire, les données de consommation de biomasse sont renseignées :

- **en valeur massique** : en tonne sèche et avec pour unité MtMS (million de tonne de matière sèche) ;

- **en valeur énergétique** : en énergie primaire (qui ne tient donc pas compte de rendements de conversion par exemple) et avec pour unité TWh_{PCI} (pouvoir calorifique inférieur).

1 Une culture intermédiaire est une culture non alimentaire implantée et récoltée entre deux cultures principales d'une rotation culturale. Une culture principale est la culture ayant le cycle le plus long ou la culture en place identifiable par des chaumes entre le 15 juin et le 15 septembre ou une culture sous contrat (source : Arvalis).

1.2. Les enjeux des usages non alimentaires de la biomasse

À l'heure où des alternatives aux énergies fossiles et matériaux pétrosourcés sont recherchées, la biomasse est considérée comme un matériau et une source d'énergie d'avenir. Elle représente un pilier important des scénarios prospectifs pour l'ensemble des usages non alimentaires.

Étant donné la diversité des ressources naturelles disponibles en France, le recours à la biomasse, sous condition d'une production durable préservant l'ensemble des services rendus par les écosystèmes, est un atout dans la transition écologique et énergétique. Cet atout peut être mis à profit, à court terme, pour les filières déjà matures et, à plus long terme, pour les filières émergentes.

Les produits biosourcés apparaissent comme incontournables dans les politiques publiques. En 2010, le Grenelle de l'environnement a affiché un objectif pour le secteur de la chimie d'utiliser au moins 50 % de matières renouvelables à l'horizon 2050. La loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 17 août 2015 considère que certains produits biosourcés ont un impact positif d'un point du vue environnemental (comme dans le secteur du bâtiment) et préconise un recours accru à leur emploi. En 2015, la France a lancé les travaux d'élaboration de sa stratégie bioéconomie et son plan d'action finalisé en 2018 est actuellement en cours de révision. L'objectif de la stratégie est de proposer une vision pour le développement, coordonné et durable, des filières basées sur la biomasse pour la production alimentaire, de matériaux, de molécules biosourcées, d'énergie et de services écosystémiques. Plus récemment, la feuille de route nationale sur l'Économie Circulaire identifie les ressources renouvelables comme moyen de diminuer la pression sur les ressources non renouvelables, au même titre que les matières issues du recyclage. Enfin la RE2020 [2] (réglementation environnementale des bâtiments neufs) devrait favoriser la pénétration des produits biosourcés utilisés dans le secteur de la rénovation des bâtiments. En effet, cette réglementation reconnaît le bénéfice associé au stockage de carbone dans les produits biosourcés en pondérant les impacts en fonction de la temporalité des émissions.

La biomasse solide doit donc contribuer, pour une plus grande part, à l'atteinte de ces objectifs (par exemple pour la production de chaleur, la méthanisation, les biocarburants). Conformément aux orientations prises dans la RE2020, elle doit aussi contribuer à abaisser le contenu carbone de la construction neuve *via* une plus grande part de produits biosourcés dans le bâtiment.

La bioéconomie

Depuis les années 2000, la bioéconomie cristallise, en France et en Europe, les ambitions d'une transition vers une économie de la biomasse susceptible d'être source de valeur ajoutée pour l'ensemble des usages. La bioéconomie, dans sa définition large, regroupe toute l'économie liée à la photosynthèse et au vivant. Sur un territoire, elle comprend donc les systèmes alimentaires, non alimentaires et de recyclage de la biomasse.

Parce qu'elle est une ressource renouvelable clé et au rythme de renouvellement relativement rapide, la biomasse est aujourd'hui au carrefour de différentes stratégies nationales (stratégie bioéconomie pour la France, projet agroécologique pour la France, programme national pour l'alimentation, plan national forêt-bois, stratégie biodiversité…) ayant vocation à être déclinées dans les régions et les territoires, en cohérence avec les stratégies de développement territorial (ex. : schéma régional biomasse, plan alimentaire territorial, plan climat air énergie territorial…).

La Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015 a donné naissance en 2018 à une Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB). Ce document d'orientation vise à développer les filières de production et de valorisation énergétique de la biomasse.

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) pour la période 2019-2028 cible par ailleurs la part de l'origine biomasse à l'horizon 2028 :

- entre 22,6 et 24,3 % pour la consommation finale brute de chaleur et de froid, contre 16,5 % en 2019 ;
- à 3,2 % pour la production de biocarburants avancés issus de biomasses lignocellulosiques, contre 0 % en 2017 ;
- entre 6 et 8 % pour l'injection de gaz dans les réseaux, contre 0,2 % en 2019 ;
- à 2,4 % pour la production d'électricité, contre 1,4 % en 2019.

Les objectifs de mobilisation de la biomasse à des fins énergétiques fixés par la PPE s'appuient sur les objectifs de mobilisation supplémentaire fixés dans le Programme National de la Forêt et du Bois (PNFB) pour l'ensemble de la biomasse forestière. Ces objectifs ont été fixés en s'assurant que le taux de prélèvement pour l'ensemble des usages reste en deçà de l'accroissement des forêts.
L'étude de prospective IGN/FCBA/ADEME montre un potentiel de récolte additionnelle important en forêt, tout en maintenant des pratiques de gestion durable.

Si la biomasse est, en France, une ressource renouvelable, sa disponibilité reste néanmoins limitée et ne peut répondre à l'ensemble des besoins de la société. Son développement doit se faire en cohérence avec les usages autres qu'énergétiques (alimentaire, matériaux…), en accord avec la stratégie bioéconomie et celle de protection de la biodiversité définies par la France et en tenant compte des autres enjeux énergétiques. Dans ce contexte, il est nécessaire de disposer d'une vision globale des différentes ressources de biomasse et de leurs usages, qui montre les interdépendances des usages d'une même ressource voire entre plusieurs ressources.

1.3. État des lieux des usages de la biomasse

1.3.1. Consommation française de biomasse

À partir des études et données disponibles, les biomasses mobilisées en 2017, tous usages non alimentaires confondus, ont été évaluées à 49,4 MtMS avec une forte majorité de ressources bois (comparativement aux autres types de ressources : agricoles, IAA…). Ces ressources bois sont valorisées pour la production de produits bois (sciage, panneaux, pâte…) et pour la production d'énergie (bois bûches, plaquettes, granulés).

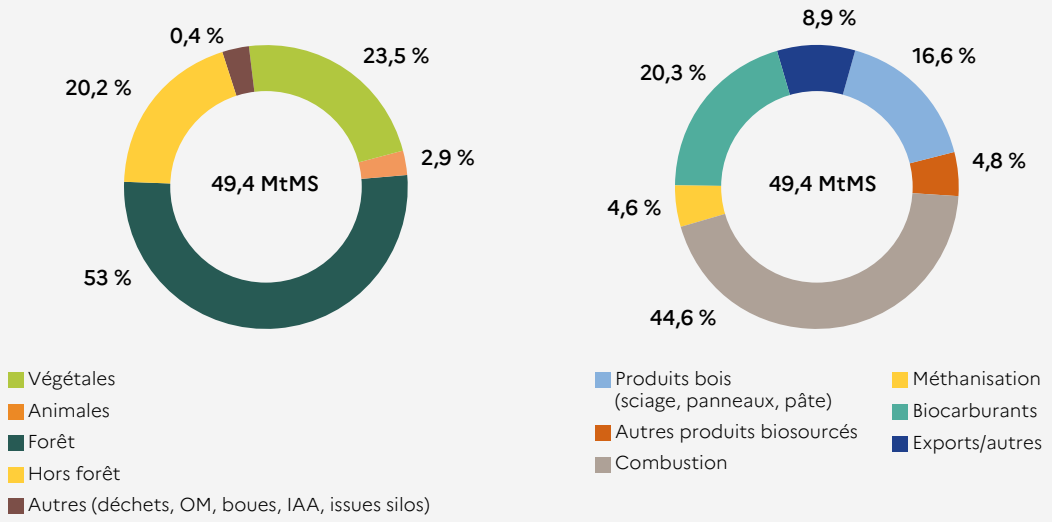
Stratégie Nationale Bas Carbone SNBC – Scénario AMS[2]

La question de la sollicitation des ressources en biomasse demeure centrale dans le scénario AMS. En effet, il s'agit d'atteindre une production de ressources en biomasse environ 2,5 fois plus importante qu'aujourd'hui (mobilisation de 430 TWh de ressources en biomasse pour une consommation d'environ 460 TWh des mêmes ressources [3]). Cette mobilisation importante est réalisée de manière durable en améliorant la gestion forestière, la gestion des terres agricoles ainsi que la gestion des déchets, en particulier ceux issus de l'agriculture et des produits fabriqués en bois.

Concernant les ressources forestières, l'augmentation importante de la récolte de bois permet une hausse significative des usages matières, les ressources en bois prélevées en forêt pour une production directe d'énergie sont sensiblement les mêmes (en 2050 comparativement à aujourd'hui). Le développement de la bioéconomie permet une valorisation énergétique plus importante de biomasse *via* les coproduits et la fin de vie des produits biosourcés.

Du côté de l'agriculture, la quantité de ressources produites pour les biocarburants de première génération n'évolue pas beaucoup. À l'inverse, la valorisation des résidus de culture et des effluents d'élevage devient la norme. Les cultures énergétiques se développent, en particulier les cultures intermédiaires.

Graphique 1 Répartition massique de la biomasse valorisée par type de biomasse et par usage en 2017



OM : ordures ménagères.

2 AMS : avec mesures supplémentaires.

1.3.2. Consommation française d'énergie et contribution de la biomasse [3]

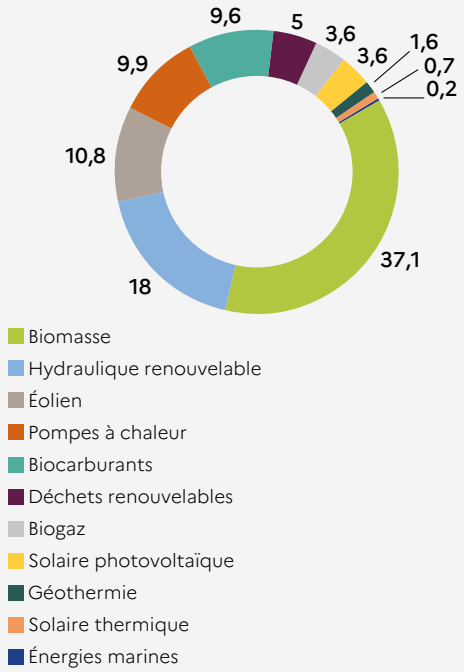
La consommation d'énergie primaire de la France s'élève à 2 850 TWh en 2019 (en données non corrigées des variations climatiques). Le bois énergie demeure la première source d'énergie renouvelable consommée en France, loin devant l'électricité d'origine hydraulique. Son principal usage est le chauffage.

En 2019, la production primaire d'énergies renouvelables s'élève à 320 TWh. Les principales filières restent la biomasse solide (37,1 %), l'hydraulique renouvelable (18 %), l'éolien (10,8 %), les pompes à chaleur (9,9 %) et les biocarburants (9,6 %).

Les biomasses considérées dans cette partie se retrouvent sur le *Graphique 2*, sous les appellations « Biomasse » (biomasse solide pour une valorisation bois énergie), « Biocarburants » (biocarburants conventionnels issus majoritairement de cultures de colza, betteraves, céréales et maïs) et Biogaz (les installations de méthanisation qui permettent la production de biométhane à partir de biomasses végétales et de déjections animales) et représentent plus de la moitié de la production primaire d'énergies renouvelables en 2019 (50,3 %).

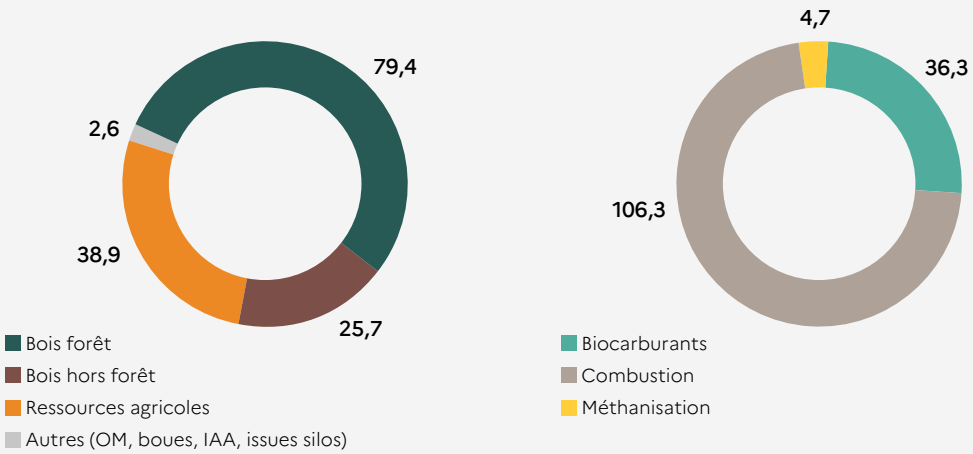
À partir des études et données disponibles, la consommation de biomasse pour des valorisations énergétiques (combustion, méthanisation, biocarburants) pour l'année 2017 a été évaluée à 147,4 TWh_{PCI} avec une forte majorité de ressources bois (comparativement aux autres types de ressources : agricoles, IAA…). Comme montré précédemment, cette valorisation est largement orientée vers la combustion (domestique et collectif/industrie).

Graphique 2 Répartition de la production primaire d'énergies renouvelables par filière en 2019



Source : [3].

Graphique 3 Consommation primaire de biomasse pour l'année 2017 (TWh_{PCI}) pour une valorisation énergétique



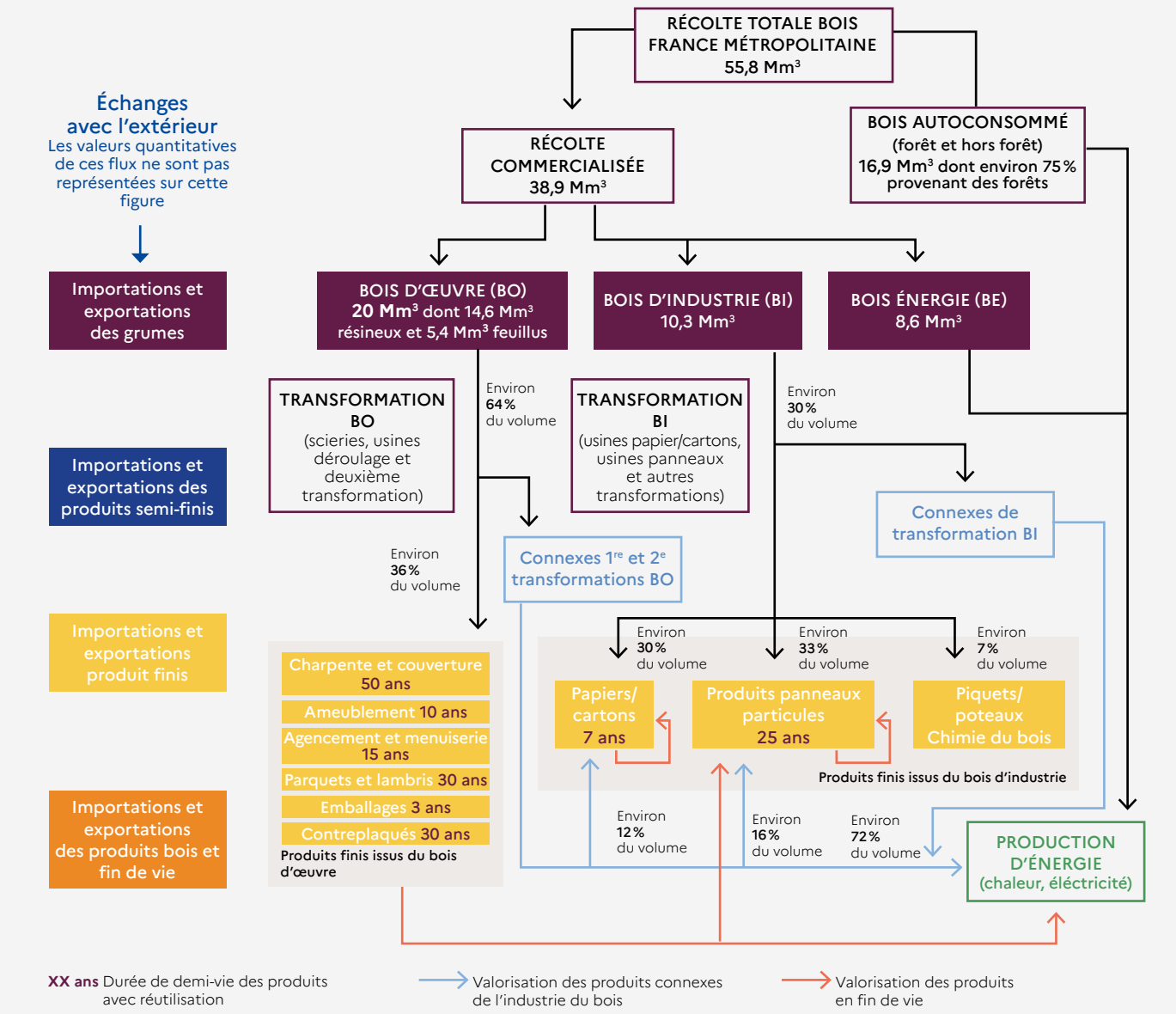
OM : ordures ménagères.

1.3.3. Bois issu de forêts [4]

La récolte de bois commercialisé progresse de 1,4 % en 2018 (par rapport à 2017, *cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*) avec près de 39 millions de mètres cubes, niveau le plus haut observé hors épisode de tempête. Elle augmente de 3,1 % pour le bois d'œuvre, de 1,7 % pour le bois énergie et continue de diminuer pour le bois de trituration destiné au secteur du papier-carton et des panneaux (- 1,9 %). La production de sciages (8,1 millions de mètres cubes) progresse de 1,1 %.

Un peu moins de la moitié de la récolte totale de bois en forêt est utilisée directement pour la production d'énergie (environ 26 Mm³ en cumulant le bois autoconsommé et le bois énergie). À cela s'ajoutent les connexes et sous-produits (première et deuxième transformations du BO, transformation du BI), ainsi que les déchets bois qui contribuent à la production d'énergie.

Figure 2 Les flux de la filière bois (bois d'œuvre, bois d'industrie, bois énergie) pour l'année 2018



Source : ADEME sur la base de Agreste et IGD 2020 [4].

1.3.4. Approvisionnement en bois bûches [5]

D'après l'enquête Marchés et approvisionnement de 2017, au niveau national :

- **64 %** des volumes consommés par les utilisateurs de bûches proviennent de la récolte en forêt, soit près de 15 millions de mètres cubes (63 % en 2012) ;
- **23 %** proviennent de l'entretien des vergers ou de haies, soit 5 millions de mètres cubes ;
- **13 %** est du bois de récupération ou de rebut, soit 3 millions de mètres cubes.

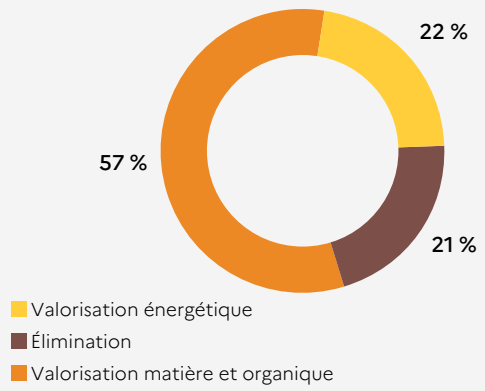
En consommation unitaire, il apparaît que les utilisateurs s'approvisionnant en forêt consomment légèrement plus (6,3 stères/ménage/an) que ceux qui s'approvisionnent dans les espaces hors forêt et en bois de rebut (~ 6 stères/ménage/an). Par ailleurs, la consommation unitaire des équipements pour les bûches (hors foyers ouverts et chaudières à bûches) augmente avec l'âge de l'équipement, ce qui démontre une efficacité plus importante des modèles récents.

1.3.5. Déchets de bois [6]

La production de déchets de bois (hors connexes de sciage) a atteint en 2012 près de 7,2 millions de tonnes, dont environ 1 million est autoconsommé par les sites les produisant. Il existe donc un gisement annuel disponible de déchets de bois de l'ordre de près de 6,2 millions de tonnes. Les emballages collectés représentent 0,9 million de tonnes soit 13 % de l'ensemble.

Les deux principaux secteurs producteurs sont le bâtiment d'une part, les ménages et les collectivités d'autre part pour respectivement 33 % et 28 %. En 2012, leur taux de valorisation est de 79 % (57 % pour un usage matière et 22 % pour un usage énergétique) *(Graphique 4)*.

Graphique 4 Valorisation des déchets bois (hors autoconsommation)



1.3.6. Produits issus de l'agriculture – biomasses végétales et déjections animales [7] [8]

À l'échelle nationale, le gisement (biomasse végétale durablement disponible) des résidus agricoles (composé des pailles et menues pailles des céréales à paille, des pailles de tournesols, colzas, pois et riz, ainsi que des rafles de maïs) est actuellement estimé à 6,6 Mt de matière brute. Il se répartit entre pailles de céréales (~ 50 %), cannes de maïs (30 %) et pailles d'oléagineux (19 %). Avec 33 % et 27 % du total national, les anciennes régions Champagne-Ardenne et Centre sont respectivement la 1re et la 2e région en termes de production de pailles de céréales. Les zones de grandes cultures des anciennes régions Poitou-Charentes et Midi-Pyrénées offrent également des potentiels intéressants en matière de gisement.

La valorisation des résidus de cultures annuelles est multiple et répond en priorité à des usages en litière (au-delà des contraintes techniques liées à la récolte et agronomiques liées au retour au sol minimum) :

- **litière pour animaux d'élevage** : les besoins en paille pour la litière animale dans l'élevage français ont été estimés à 10,2 millions de tonnes sur la base des effectifs d'animaux révisés annuellement et traités par catégorie ;
- **usages énergétiques** : les pailles peuvent être utilisées directement comme combustibles ou entrer dans la fabrication de granulés pour chaudières. Leur utilisation reste marginale ;
- **matériaux** : l'utilisation des pailles comme matériaux (isolants, panneaux de particules, pâte à papier) reste encore très marginale.

Les déjections animales représentent 120 millions de tonnes (Mt) de matière brute, 24,2 Mt de matière sèche et 19,4 Mt de matière organique. Converties en biogaz, elles correspondraient potentiellement à 45 TWh d'énergie primaire issue à 76 % de la filière ruminants, 10 % de la filière équine, 9 % de la filière avicole et 5 % de la filière porcine. La Bretagne est la première région productrice de déjections animales brutes devant les Pays de la Loire (respectivement 18 % et 14 % de la production nationale) mais cette dernière devance la Bretagne en termes d'équivalent énergie primaire (respectivement 13 % et 14 %).

Les biocarburants consommés en France sont très majoritairement produits à partir de matières premières agricoles (environ 93 % en volume en 2016) et en proportion très minoritaire de biomasses résiduelles (huiles alimentaires usagées, graisses animales, sous-produits de la vinification). L'origine des matières premières est majoritairement française (environ 54 % en volume en 2016), mais avec des proportions très variables entre filière gazole (autour de 50 % en

volume) et filière essence (environ 80 %). Elle reste européenne à environ 77 % au global, 74 % pour la filière gazole et 98 % pour la filière essence. Les cultures utilisées pour la production de biocarburants représentent en France environ 800 000 ha, soit autour de 3 % de la surface agricole utile (SAU).

1.3.7. Des gisements issus des industries agroalimentaires divers et pour de multiples usages [1]

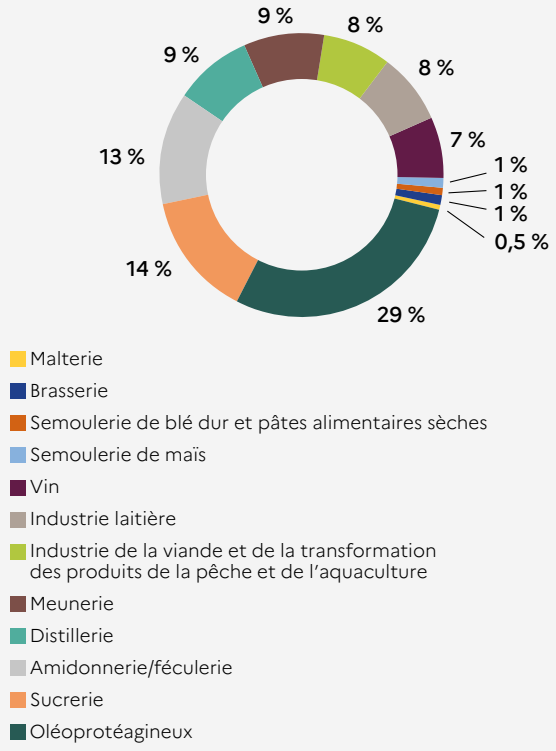
En 2016, le gisement de coproduits des industries agroalimentaires enquêtées s'élève à 12,1 millions de tonnes de matière sèche. Avec 29 % du volume total, le secteur des oléagineux est celui qui génère le plus de coproduits. Viennent ensuite la sucrerie et l'amidonnerie-féculerie à hauteur respectivement de 14 % et 13 %. Ainsi, ces trois secteurs génèrent à eux seuls plus de la moitié des coproduits *(Graphique 5)*.

Cinq autres secteurs génèrent individuellement de 7 % à 9 % du volume : distillerie, meunerie, industrie de la viande et de la transformation des produits de la pêche et de l'aquaculture, industrie laitière et vin.

Les différentes voies de valorisation se répartissent de la façon suivante *(Graphique 6)* :

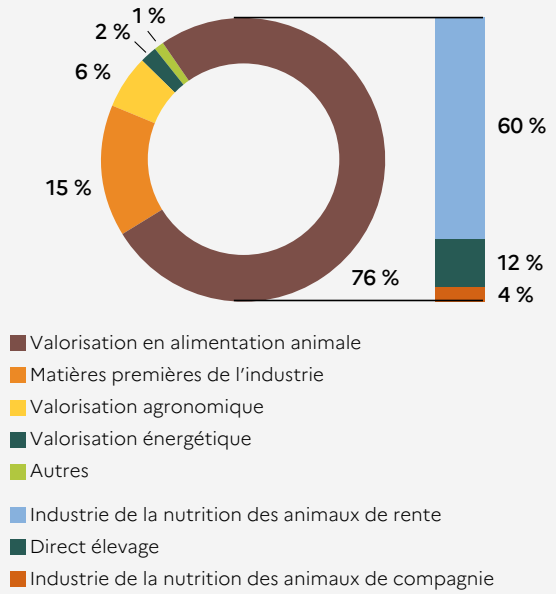
- **76 % soit 9,3 millions tonnes** de matière sèche ont été valorisées en alimentation animale, majoritairement par les industriels de la nutrition pour les animaux de rente et dans une moindre mesure par les industriels de la nutrition pour animaux de compagnie ou directement en élevage ;
- **15 %** ont été valorisés en tant que matières premières des industries. Cette forme de valorisation correspond soit à une utilisation pour l'alimentation humaine comme les sons de blé soit pour d'autres industries comme celles des biocarburants ou la cosmétique ;
- 6 % du volume est destiné à des valorisations agronomiques (épandage, fertilisation, compostage) ;
- 2 % est en valorisation énergétique (méthanisation, combustion).

Graphique 5 Répartition des volumes de coproduits par secteur (en tonnes de matière sèche)



Source : [1].

Graphique 6 Répartition des coproduits dans les différentes voies de valorisation



Source : [1].

1.4. Les produits biosourcés : éléments clés pour la transition de la chimie

Le secteur de l'industrie chimique est fortement dépendant de l'utilisation des ressources fossiles. Pour réaliser la transition de ce secteur, en plus du défi énergétique, la biomasse représente un élément clé de substitution *via* le développement des produits biosourcés. Ces derniers ont longtemps été utilisés en tant que réactifs, composants et produits avant d'être remplacés par les hydrocarbures à partir du XIXe siècle. Avec l'explosion des procédés basés sur le pétrole, les produits biosourcés n'ont pas suivi la même croissance. L'industrie chimique s'est développée exclusivement en utilisant les hydrocarbures comme matière première en intrant (*cf.* chapitre *2.2.3. Production industrielle*).

1.4.1. Les filières biosourcées

Les produits biosourcés sont issus des molécules extraites des plantes. Ils sont actuellement utilisés dans plusieurs secteurs tels que la construction (isolants, peintures, colles), le secteur automobile (composants, huiles, lubrifiants), le secteur chimique avec les produits sanitaires (produits d'entretien, lessives, produits de nettoyage, etc.), les emballages ou les produits cosmétiques. L'objectif de la substitution des produits pétrosourcés par des produits biosourcés est d'améliorer l'empreinte environnementale des produits consommés. Cependant, les bénéfices environnementaux des produits biosourcés dépendent de la biomasse utilisée, du procédé mis en œuvre, de l'utilisation du produit et de sa fin de vie. Ainsi, une analyse de cycle de vie (ACV) de chaque nouveau produit biosourcé est nécessaire pour quantifier ses bénéfices ou ses impacts réels. Ainsi, on sait aujourd'hui que le caractère biosourcé d'un produit n'est pas systématiquement associé à un bilan environnemental amélioré[3] par rapport à celui d'un produit analogue issu de ressources non renouvelables. Plus précisément, sur l'étape de production de la biomasse, son caractère renouvelable ne va pas forcément de pair avec une production durable[4]. De plus, il est aujourd'hui reconnu que substituer l'ensemble des matières premières non renouvelables par de la biomasse est illusoire, d'autant plus si le niveau de consommation des ressources continue à être aussi élevé[5]. Par ailleurs, les matériaux biosourcés peuvent représenter un moyen de séquestration du CO_2 qui sera d'autant plus important que la durée de vie du produit sera longue. Mais ce stockage est considéré comme marginal en dehors des produits pour le bâtiment (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

De plus, les produits biosourcés peuvent apporter de nouvelles fonctionnalités permettant de présenter un avantage supplémentaire par rapport aux produits pétrosourcés. Par exemple, des isolants produits à partir d'un mix lin/chanvre/coton recyclé auront des propriétés thermiques et acoustiques similaires à des isolants classiques (*i.e.* laine de verre ou polystyrène) mais apporteront, en plus, un confort d'été amélioré grâce à leur forte inertie thermique. Les produits biosourcés font l'objet d'une demande croissante de la part des consommateurs qui recherchent des produits moins nocifs pour la santé ou l'environnement [9]. Avec le développement de l'économie circulaire, un principe nouveau de la valorisation de la biomasse se met en place : la transformation de la matière en cascade. Dans ce concept, les résidus ne sont pas considérés comme des déchets mais comme de nouvelles matières appelées coproduits, valorisables et dont les transformations créeront des résidus eux-mêmes susceptibles de devenir valorisables. En fin de cascade, les déchets qui restent conservent une valeur économique parce qu'ils contiennent généralement encore de l'énergie (noyaux d'olives brûlés dans des chaudières d'usine, par exemple).

1.4.2. Des évolutions différentes selon les marchés

COMPLEXITÉ DU MARCHÉ VISÉ

Les filières de produits biosourcés se sont développées avec des vitesses d'évolution différentes selon leur niveau de maturité initial, l'importance de la demande des marchés applicatifs et des investissements industriels réalisés [10]. En 2015, l'ADEME a réalisé une étude afin de caractériser les marchés des produits biosourcés et d'élaborer des scénarios prospectifs aux horizons 2020 et 2030 [11]. Cette étude a pointé le manque récurrent de données qui s'explique notamment par la complexité de la chaîne de valeur, les différents produits issus des premières transformations de la biomasse trouvant une application dans un large panel de marchés. Ainsi, les produits de première transformation destinés aux secteurs de la chimie et des matériaux constituent un débouché majeur en France. En 2012, près de 15 %

3 Sur le cycle de vie du produit.
4 Au sens de développement durable et ses trois piliers : économie, social, environnement.
5 Et d'autant plus si on s'attache à la relocalisation et à la diversification d'activités en France, le territoire national étant relativement limité en surfaces, contrairement à un pays comme les États-Unis par exemple.

de la production française de grands intermédiaires issus des premières transformations de la biomasse (amidon, saccharose, fibres, huiles…), soit 1 651 kt, ont été destinés à l'industrie chimique et à la production de matériaux. Le reste de la production a été utilisé pour des usages alimentaires, énergétiques (biocarburants) et pharmaceutiques. Environ 1 070 kt de produits de première transformation ont été consommés.

1.4.3. Les catégories de biomasses clés pour le développement de la filière

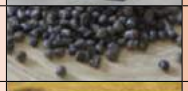
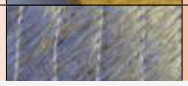
Parmi toutes les biomasses utilisables pour la fabrication de produits biosourcés, quatre catégories de biomasses sont principalement concernées : les cultures céréalières, les cultures oléagineuses, les fibres techniques et les algues.

LES CULTURES CÉRÉALIÈRES ET LES BETTERAVES (SUCRES) :
Outre l'alimentation, les céréales (blé, maïs) et la betterave sont essentiellement destinées à un usage carburant (bioéthanol [12]). Pour plus de détail, voir le chapitre *2.3.4. Carburants liquides*. La production du bioéthanol peut aussi être utilisée pour la fabrication d'éthylène (déshydratation de l'éthanol) qui sert ensuite dans la fabrication d'intermédiaires chimiques pouvant déboucher sur la fabrication de plastiques.

LES CULTURES OLÉAGINEUSES (HUILES) :
Les oléagineux peuvent être utilisés dans la production de biodiesel (biocarburants conventionnels) *via* les bioraffineries. Pour plus de détail, voir le chapitre *2.3.4. Carburants liquides*. La mise en place de bioraffineries fonctionnant à base d'huiles conduit à la coproduction de bionaphtalène, en même temps que le biogazole/bioJetFuel, qui est ensuite utilisé pour la production des polymères et ensuite de plastiques.

LES FIBRES TECHNIQUES :
Lin et chanvre se développent, pour des usages matériaux [13]. La valorisation des fibres végétales en matériaux est aujourd'hui une réalité sur l'ensemble des domaines d'applications : panneaux, isolants, bétons, plasturgie, composites à fibres continues. Ces valorisations sont notamment liées aux performances particulières de ces matières (renforcement, allègement, isolation thermique et phonique, amortissement…). Les fibres végétales techniques (à l'exception des pailles de céréales) sont extraites de la plante (défibrage), puis préparées afin d'obtenir la « morphologie » adaptée aux besoins et d'être utilisées au niveau industriel *(Tableau 1)*. Les principales fractions issues de la première transformation des fibres sont les fibres longue (dm), les fibres courtes (cm), les granulats (mm) et les poudres (µm). Actuellement, 280 000 à 290 000 tMB/an de fibres végétales techniques sont valorisées en matériaux [13] dont 95 % correspondent aux cultures dédiées du lin et du chanvre et 83 % sont des granulats (valorisés en panneaux de particules, des bétons ou des isolants de remplissage). Les fibres de lin et de chanvre sont produites en grande quantité avec la présence d'outils industriels de production et s'appuient sur des filières

Tableau 1 Usages actuels des fibres végétales techniques en France

Typologie de matériaux		Type de fibres et renforts		Taux d'incorporation en fibres végétales (%)	Volume produits en France (tonne/an)
Isolants	Isolants souples	Fibre (cm), isolant		> 90	7 200
	Isolants de remplissage	Bottes		100	4 600
Bétons	Enduits, mortiers, blocs/parpaings	Granulat		20 à 50	40 000
Panneaux de particules	Panneaux de particules allégés	Granulat		90 à 95	330 000
Composites	Pièces plastiques injectées	Fibre (mm), compound		20 à 30	6 000
	Pièces thermo-compressées à base de non-tissés	Isolants de remplissage		50	3 000 à 4 000
	Composites à fibres continues	Non-tissé, ruban, unidirectionnel, multiaxial…		30 à 50	± 7 000

Source : FRD, 2019.

structurées. Leur potentiel de valorisation en matériaux est réel. Toutes les composantes de la plante sont valorisées, ne générant ainsi aucun déchet au sens de la réglementation européenne. La surface de production de lin est de 97 700 ha/an (0,36 % de la SAU). La surface de production du chanvre est de 16 700 ha/an (0,06 % de la SAU).

Parmi les espèces végétales cultivées en France, un certain nombre sont ou peuvent être utilisées à des fins matériaux : lin fibre, chanvre, paille de céréales ou de colza, miscanthus… Cependant, toutes ces espèces ne font pas l'objet du même degré de connaissance et de recherche ni du même degré d'utilisation.

Trois groupes de plantes à fibre se distinguent :

- les fibres disponibles : chanvre, lin fibre ;
- les fibres en devenir : pailles de céréales, de lin, de colza, d'oléagineux ;
- les fibres potentielles : miscanthus, ceps de vigne, cannes de tournesol, sorgho, ortie…

LES ALGUES :
Le terme « microalgues » regroupe l'ensemble des microorganismes photosynthétiques. Face aux millions d'espèces estimées, le potentiel des microalgues reste encore largement à explorer. Les débouchés potentiels des microalgues sont variés (chimie, cosmétiques, pharmacie, énergie) et dépendent de la composition biochimique des algues, qui elle-même varie selon les espèces ou encore les conditions de culture et de croissance. Certaines espèces ont la capacité de produire des composés ayant un potentiel énergétique comme les lipides (source de biodiesel) ou l'amidon (source de bioéthanol).

Le terme « macroalgues » est un terme générique englobant tous les organismes aquatiques eucaryotes photosynthétiques multicellulaires non terrestres. On répertorie aujourd'hui environ 8 000 espèces de macroalgues dans le monde. Les débouchés pour les produits macroalgaux sont principalement l'alimentation humaine et animale mais peuvent être également de même nature que pour les microalgues.

La production française de macroalgues est estimée à 72 000 tonnes annuellement (essentiellement en Bretagne) [14]. Les algues sauvages qui sont récoltées en mer, sur l'estran ou sur le rivage représentent la majorité de la production. En 2018, la production en culture était de 121 tonnes de macroalgues (poids vif[6]), 4 tonnes de microalgues (poids vif) et 63 tonnes de spirulines (masse sèche-MS) [15]. Par ailleurs, en plus de produire des molécules d'intérêt, les algues peuvent assurer des services environnementaux comme le traitement des eaux et la valorisation du CO_2.

1.4.4. Produits chimiques à partir du *power-to-liquid*

Pour compléter l'offre de produits biosourcés, un autre procédé a été considéré dans ces travaux : la valorisation du CO_2. Il s'agit de la réaction du CO_2 avec l'hydrogène qui est une réaction faisant partie de la famille des technologies de valorisation du CO_2 aussi appelée CCU (*carbon capture and utilisation*) [16]. Les procédés de valorisation du CO_2 sont encore au stade R&D et donc avec une faible maturité. Le principal verrou est la consommation énergétique importante de ces technologies. Le *power-to-liquid* (P-t-L) est l'une des voies de production du méthanol. Cette technologie est encore en développement avec de nombreux démonstrateurs qui sont ou ont été mis en place à travers le monde. À partir du méthanol, il est ensuite possible de produire de l'éthylène. Cette brique technologique est déjà mature. Elle est commercialisée en Chine (18 Mt/an). Différentes sources de CO_2 peuvent être utilisées : des sources fossiles (ex. : cimenterie ou site sidérurgique) ou sur des sources biogéniques (ex. : unités de bioraffineries ou de méthanisation). Ici, seules les sources d'origine biogéniques ont été considérées.

1.4.5. Un démarrage encore timide

EN FRANCE

Les matériaux biosourcés utilisés dans la construction ou la rénovation de bâtiments (composites, bétons et isolants) progressent modérément mais représentent des tonnages non négligeables. Leur pénétration dépend principalement de leur coût (en concurrence avec les produits pétrosourcés) et leurs performances techniques. D'après l'Association des industriels de la construction biosourcée, la part de marché des isolants biosourcés s'élève à 10 % en 2020. Cette part pourrait doubler d'ici cinq ans grâce notamment à la RE2020 [2].

Étant donné les obligations de restriction d'usages des plastiques [17] [18], on considère qu'il n'y aura pas d'évolution majeure dans ce secteur. Environ 1 % du plastique consommé ou produit en France est biosourcé.

6 Le « poids vif » correspond au poids à l'algue collectée et non transformée.

AU NIVEAU EUROPÉEN (BIORAFFINERIES)

La production actuelle de produits chimiques et de matériaux biosourcés provenant des bioraffineries[7] de l'UE est estimée à 4,6 millions de tonnes [19]. Il a été estimé un potentiel de 7,7 millions de tonnes à l'horizon 2030 avec le lancement de nouvelles bioraffineries et l'augmentation de la capacité de production des bioraffineries existantes dans un scénario optimiste de la Commission européenne. Parmi les bioraffineries actuelles *(Tableau 2)*, 803 sont identifiées en UE, 507 produisent des produits chimiques biosourcés, 363 des biocarburants liquides et 141 des composites et fibres biosourcées. Parmi ces installations, les bioraffineries intégrées, qui combinent la production de produits biosourcés et d'énergie, sont au nombre de 177. L'Union européenne dépend des importations pour 8 des 10 catégories de produits identifiées dans le *Tableau 2*.

En Europe, le chiffre d'affaires des produits chimiques et plastiques biosourcés est de 60 milliards d'euros (EU-28, 2017) et de 24 milliards d'euros (EU-28, 2017) pour les biocarburants [20]. Le chiffre d'affaires des produits biosourcés représente 7,5 % de l'industrie de la chimie en 2017 et monte à 15 % pour la seule chimie organique (l'industrie de la chimie étant à 50 % organique et à 50 % inorganique).

Pour la partie méthode, hypothèses et résultats de modélisation de la part des produits biosourcés dans chacun des scénarios, se référer au chapitre *2.3.4. Carburants liquides*.

Tableau 2 Estimations de la production totale européenne de produits biosourcés, de leur part de production et de leur consommation par catégorie dans l'Union européenne [19]

Catégorie de produit	Production européenne de produits biosourcés (kt/an)	Part de la production européenne de produits biosourcés (%)	Consommation européenne de produits biosourcés (kt/an)
Molécules plateformes	181	0,3	197
Solvants	75	1,5	107
Polymères pour plastiques	268	0,4	247
Peintures, enduits, encres, colorants*	1 002	12,5	1 293
Tensioactifs	1 500	50	1 800
Cosmétique et produits d'hygiène personnelle*	558	44	558
Adhésifs*	237	9	320
Lubrifiants*	237	3,5	220
Plastifiants*	67	9	117
Fibres synthétiques	600	13	630
TOTAL	**4 725**	**3**	**5 489**

* Aucune donnée sur la production totale européenne n'ayant été identifiée, il a été supposé que la production européenne totale (fossile et biosourcée) était égale au marché total européen (consommation des produits fossiles et biosourcés).

7 L'étude exclut les sites industriels dédiés à la production de bioénergie et de biocarburants ainsi que les installations conventionnelles de traitement de la biomasse (par ex. production de papier).

2. Description de la méthode et outils de quantification des scénarios

2.1. Méthodologie générale de construction des scénarios

Le gisement de biomasse pour un usage non alimentaire est d'abord la résultante de choix et hypothèses sur l'évolution de nos systèmes agricoles et forestiers ainsi que sur nos régimes alimentaires. À ce titre, selon les scénarios considérés, les volumes et quantités de biomasses issus de ces systèmes varient fortement selon leurs niveaux d'implantation (surfaces, rendements) et leurs taux de mobilisation (ex. : taux de prélèvements de bois dans les forêts existantes).

Se pose ensuite la question de leurs valorisations et des arbitrages, selon les usages considérés et le niveau de demande pour ces usages. Par ailleurs, certaines biomasses, non directement issues des systèmes de production agricole ou sylvicole, résultent de chaînes de transformation des biomasses « primaires » ou d'éventuels premiers usages d'une ressource (exemple : déchets bois, produits connexes de scierie, liqueur noire…).

Les scénarios présentés ci-dessous présentent donc une vision globale de la valorisation de la ressource en biomasse, vision équilibrée entre l'offre (gisement) et la demande (usages) tenant compte de facteurs physiques de conversion, transformation, réutilisation ou recyclage des biomasses considérées. Dans cet objectif, l'ADEME a développé un tableur interne permettant de cartographier l'ensemble des ressources disponibles et de tracer les flux de biomasse. Cette approche permet ainsi de donner une vision globale de l'offre et des usages de la biomasse pour chacun des scénarios.

Pour l'ensemble des scénarios, les usages matériaux et chimie (produits biosourcés dans leur ensemble) sont regardés en priorité avec un gisement de biomasse suffisant à y consacrer. La hiérarchie des usages de la biomasse tient donc compte d'une valorisation première en produits biosourcés, puis d'un usage énergétique des biomasses :

- **les usages en produits biosourcés**, bien que très divers, sont majoritairement des usages en bois matériau pour la construction et la rénovation des bâtiments. Ces derniers sont largement dépendants des volumes de bois d'œuvre et de bois d'industrie issus de la forêt (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*). Cependant, d'autres ressources, selon les scénarios, peuvent venir compléter et augmenter d'autant les usages matériaux de biomasses lignocellulosiques (déchets bois notamment), en tenant bien compte de difficultés techniques liées à l'utilisation de telles biomasses ;
- **la valorisation énergétique des ressources** en biomasse est par la suite considérée pour participer à l'atteinte des objectifs de décarbonation de notre consommation énergétique. Selon les scénarios ci-dessous, priorité est donnée à tel ou tel usage énergétique. Cependant, pour la biomasse agricole, l'usage en méthanisation reste la voie privilégiée, avec des niveaux d'implantation et de mobilisation de certaines ressources (effluents d'élevage, cultures intermédiaires, résidus de culture) très supérieurs à ceux d'aujourd'hui. Les usages en combustion, biocarburants, voire pyrogazéification, évoluent fortement d'un scénario à l'autre selon les hypothèses de demande ou de disponibilité de la biomasse résiduelle (non valorisée par ailleurs).

2.2. Ressources disponibles

Concernant la ressource bois issue des forêts, et au-delà des scénarios de récolte du bois forêt détaillés dans le chapitre *2.2.2. Production forestière*, les hypothèses suivantes ont été retenues pour l'estimation des ressources disponibles, les usages envisageables et leur articulation :

- **maintien des rendements de première transformation (bois d'œuvre et bois d'industrie) actuellement observés** :
  - procédé de sciage (en tonne sèche) : 36 % de produits de sciage, 64 % de produits connexes de scierie (PCS) ;
  - procédé du secteur des panneaux (en tonne sèche) : 80 % panneau, 20 % PCS ;
  - procédé du secteur papetier (en tonne sèche) : 44 % pâte, 42 % liqueur noire, 14 % PCS ;

- **modification du niveau de valorisation des différentes ressources** :
  - bois d'œuvre : à l'horizon 2050, maintien (scénario tendanciel), réduction de moitié (scénarios 1 à 3) ou augmentation (scénario 4) des exports de grumes (résineux et feuillus) comparativement aux volumes observés actuellement ;
  - bois d'industrie : à l'horizon 2050, répartitions par usage (en tonne de matière sèche) différentes selon les scénarios en réponse à des niveaux de demande des secteurs de la pâte à papier et des panneaux de bois variables :
    - le secteur des panneaux de bois valorise de 49 % à 60 % de la ressource en bois d'industrie, selon les scénarios ;
    - le secteur des papetiers valorise de 32 % à 43 % de la ressource en bois d'industrie, selon les scénarios ;
    - dans tous les scénarios, 8 % du bois industrie correspond aux poteaux, rondins et piquets (bois d'industrie durables) ;
  - réorientation d'une partie du bois d'industrie feuillus en bois d'œuvre feuillus, en lien avec l'étude Ressources 2016 [21] qui faisait le constat que la moitié du bois d'œuvre potentiel feuillus n'était pas vendu comme du bois d'œuvre. Ainsi, pour les scénarios avec des besoins en bois d'industrie (secteur pâte à papier) en forte décroissance, une part du bois d'industrie feuillus (maximum 40 %) est réorientée vers un usage bois d'œuvre feuillus. Ce scénario induit par ailleurs une évolution du secteur industriel et des applications produits bois pour une telle ressource.

En complément de la ressource bois forêt, les ressources lignocellulosiques suivantes sont également considérées :

- **introduction de cultures lignocellulosiques sur des terrains agricoles (dans le cadre d'une évolution globale de l'assolement)** : selon les scénarios, et afin de répondre à des usages énergétiques de la biomasse (combustion ou biocarburants), des cultures de type miscanthus ou switchgrass sont implantées puis valorisées. Les rendements retenus pour ces cultures sont de 10 tMS/ha ;

- **bois hors forêt** : en lien avec l'évolution des systèmes agricoles (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*) et notamment le développement de l'agroforesterie, les ressources de bois hors forêt (haies, vergers…) augmentent significativement et en priorité pour S1, S2 et S3 ;

- **déchets de bois** : l'étude [6] détaille deux scénarios prospectifs (sur la période 2015-2025) de valorisation des déchets de bois. À défaut d'autres données, les données prospectives pour 2025 sont ainsi conservées pour les scénarios ci-dessous. Ainsi, les hypothèses suivantes sont considérées :
  - pour S1 et S2, priorité à la valorisation matière des déchets bois ;
  - pour S3 et S4, priorité à la valorisation énergétique des déchets bois.

Concernant les estimations et usages potentiels des ressources agricoles, les données sont majoritairement issues des hypothèses retenues pour l'évolution des systèmes agricoles (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*). Ainsi, pour le calcul des ressources disponibles et utilisables, les règles suivantes ont été retenues :

- pour chaque scénario, **estimation du gisement de biomasse utilisable** (GU) calculé à partir du gisement potentiel maximal et tenant compte de la demande alimentaire, de contraintes techniques, de contraintes agronomiques (retour au sol) et de durabilité, ainsi que du taux de mobilisation de chacune des ressources ; les gisements potentiels maximums sont quantifiés à partir de données de SAU, de cheptels (bovins, volailles, porcins…), de rendements (tMS/ha) ou de surfaces implantées ;

- par scénario, les **surfaces implantées**, les **rendements** et les **cheptels** évoluent fortement et induisent par conséquent des quantités de biomasse utilisable très variables.

L'ensemble des informations (surfaces, rendements, taux de mobilisation, gisement mobilisé) pour les ressources de biomasse agricole, bois et déchets pour les quatre scénarios est rassemblé dans les *Tableau 3* et *Tableau 4*.

2.3. Capacités et limites technico-économiques

Que ce soit du point de vue offre ou demande, la mobilisation et les usages non alimentaires de la biomasse sont en partie conditionnés par le déploiement de pratiques agricoles, sylvicoles, de filières industrielles de transformation des biomasses (première et deuxième transformation du bois…) ou de technologies de valorisation énergétique matures (méthanisation…), mais également à l'émergence de filières encore actuellement au stade de la démonstration (biocarburants avancés, pyrogazéification pour injection de méthane).

Le déploiement de pratiques, filières et technologies matures sera donc dépendant des futures évolutions en matière de baisse des coûts de production, de mécanismes de soutien (pour pallier les éventuels écarts de coûts de production ou inciter les changements de pratique) et d'émergence de nouvelles filières industrielles en capacité de transformer les ressources disponibles.

L'émergence de technologies actuellement au stade de la démonstration dépendra des avancées de ces opérations pilotes aussi bien d'un point de vue technique, économique qu'environnemental.

Tableau 3 Déchets et ressources en biomasses agricoles mobilisés (surfaces, rendements, taux de mobilisation, énergie primaire), tous usages non alimentaires confondus

	Cultures intermédiaires	Cultures dédiées (céréales, maïs, oléagineux, betteraves)		Prairies (permanentes/ temporaires)	Résidus de culture	Élevage (déjections)	Déchets IAA	Ordures ménagères (biodé-chets)	Boues de STEP	Déchets verts (herbe bord de route)	Algues
Hypothèses (rendements, surfaces, effectifs…)	**Surfaces:** • grandes cultures (céréales oléoprotéagineux) **Rendement:** • S1-S2 : 6 tMS/ha • TEND-S3-S4 : 8 tMS/ha	**Rendement:** • céréales : 5-7,5 tMB/ha • maïs (plante entière): 15 tMS/ha • colza : 2,5-3 tMB/ha		**Surfaces:** selon SAU **Rendements:** 5 (perm)-9 (temp) tMS/ha	**Export (de la parcelle):** ⅓ de la production de pailles	**Effectifs:** selon scénarios	**Activité IAA:** selon scénarios				
Taux de mobilisation	**TEND:** 15 % **S1-S2-S3-S4:** 25 %			**TEND:** 5 % **S1 à S4:** 10 %	**TEND:** 50 % **S1 à S4:** 100 % en tenant compte des besoins en litière	**S1-S2:** 20 % **TEND-S3-S4:** 35 %	100 % coproduits non valorisés	15 % gisement brut			
Gisement mobilisé (MtMS)	**TEND:** 12,5 **S1:** 18,9 **S2:** 19 **S3:** 20,4 **S4:** 22,8	**TEND:** 10,5 **S1:** 11,1 **S2:** 6,8 **S3:** 11,9 **S4:** 12,9		**TEND:** 3,3 **S1:** 5 **S2:** 6,3 **S3:** 7,3 **S4:** 6,8	**TEND:** 15,3 **S1:** 17,9 **S2:** 16,2 **S3:** 13,9 **S4:** 17,3						
Énergie primaire (TWh_{PCI})	**TEND:** 30,4 **S1:** 46 **S2:** 46,2 **S3:** 49,5 **S4:** 55,3	• **Méthanisation** **TEND:** 6,3 **S3:** 9,1 **S4:** 10	• **Biocarburant** **TEND:** 21,9 **S1:** 31,7 **S2:** 18,4 **S3:** 24,4 **S4:** 25,1	**TEND:** 8,1 **S1:** 12,5 **S2:** 15,7 **S3:** 18 **S4:** 16,8	**TEND:** 15,8 **S1:** 36,4 **S2:** 33 **S3:** 28,8 **S4:** 36,1	**TEND:** 24,3 **S1:** 9,8 **S2:** 10,6 **S3:** 20,2 **S4:** 20,6	**TEND:** 1,5 **S1:** 1 **S2:** 1,6 **S3:** 1,7 **S4:** 1,9	**TEND à S4:** 2,5	**TEND à S4:** 1,8	**TEND à S4:** 1,9	**S3:** 5,5 **S4:** 7,9

Tableau 4 Ressources lignocellulosiques tous usages non alimentaires confondus

	Bois forêt	Bois hors forêt	Cultures lignocellulosiques	Déchets bois
Gisement mobilisé (MtMS)	TEND : 29,9 S1 : 25,5 S2 : 29,9 S3 : 34,9 S4 : 34,9	TEND : 10,6 S1 : 10,9 S2 : 11,8 S3 : 11,2 S4 : 10,6	TEND : 0,4 S1 : 5 S2 : 5 S3 : 9,8 S4 : -	TEND : 6,2 S1 : 6 S2 : 6 S3 : 6,2 S4 : 6,2

3. La biomasse, une mobilisation et des usages variables selon les scénarios

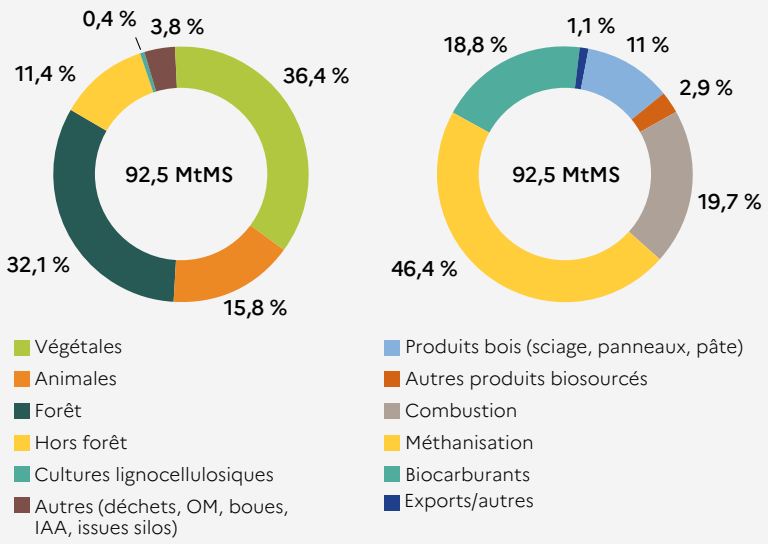
3.1. Scénario tendanciel : prolongement sans rupture

Ce scénario est une prolongation linéaire (et sans évolution brutale) des voies de valorisation déjà identifiées ou en cours de développement et qui émergeraient à cet horizon (produits bois, combustion, méthanisation, biocarburants conventionnels et avancés).

La consommation de biomasse en 2050, pour des usages non alimentaires, est en nette croissance avec un niveau annuel de 92,5 MtMS (+86 % comparativement à l'année 2017) *(Graphique 7)*.

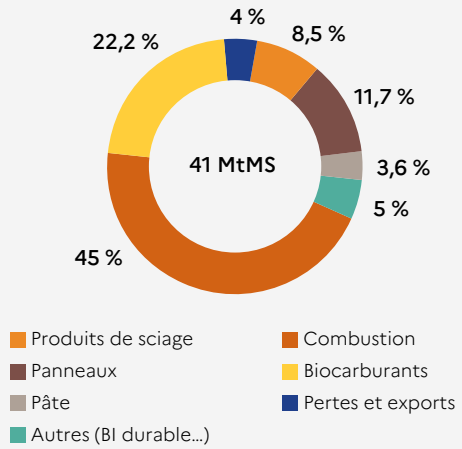
Spécifiquement, sur les biomasses lignocellulosiques, la quantité valorisée est de l'ordre de 41 MtMS, majoritairement issue de forêts *(Graphique 8)*. Leur valorisation est par ailleurs relativement diversifiée. Elle permet d'accompagner le développement de la filière biocarburants avancés, la croissance de l'utilisation de produits bois dans les bâtiments et une filière bois énergie constante. *A contrario* des autres scénarios, les cultures lignocellulosiques ne sont pas présentes sur le territoire.

Graphique 7 Répartition massique de la biomasse valorisée par type de biomasse et par usage en 2050 dans le scénario tendanciel



OM : ordures ménagères.

Graphique 8 Répartition massique des biomasses lignocellulosiques par usage (% du tonnage global) en 2050 dans le scénario tendanciel



HYPOTHÈSES STRUCTURANTES ET ARTICULATION DES USAGES

La structure de ce scénario (augmentation de la biomasse valorisée, répartition entre usages de la biomasse…) résulte des choix suivants *(Graphique 9)* :

- **dans le cadre d'une politique sylvicole de dynamisation des pratiques de gestion progressive dans le temps et dans l'espace**, la récolte totale de bois en forêt croît proportionnellement avec une augmentation plus importante du bois industrie/bois énergie (+ 18,5 %) que du bois d'œuvre (+15 %) ;

- **une augmentation de l'utilisation de produits bois pour la construction et la rénovation des bâtiments** : + 20 % de produits de sciage consommés et + 35 % de panneaux de bois. Par ailleurs, une relative stagnation (+ 6 %) de la production de pâte à papier vierge est également observée dans ce scénario ;

- **la demande globale en bois énergie évolue peu** : on observe une baisse de la demande en bois domestique compensée par une hausse de la consommation de bois énergie pour le secteur collectif/industrie ;

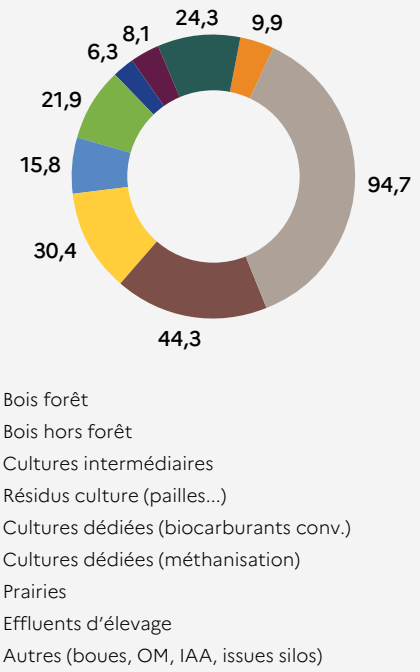
- **les gisements de biomasses agricoles et déjections d'élevage disponibles pour un usage énergétique** augmentent fortement en lien avec le développement massif de la méthanisation au sein des exploitations agricoles. Le cheptel (bovin, ovin, porcin, volaille…) reste élevé avec un taux de mobilisation des effluents d'élevage de 35 % permis par une amélioration de leur mobilisation et une conduite des élevages encore majoritairement en bâtiments. Les cultures intermédiaires se développent sur les zones de grandes cultures, sans pour autant qu'il y ait de volonté particulière d'en faire un standard dans les pratiques agricoles. Le gisement des cultures intermédiaires reste modéré (~ 12 MtMS) en raison des surfaces implantées et de conduites des cultures non optimisées ;

- **le développement des biocarburants avancés** permet de valoriser les ressources lignocellulosiques non utilisées par ailleurs. En effet, le niveau de consommation de bois énergie relativement stable permet d'orienter une partie de la biomasse lignocellulosique vers la filière biocarburants. À cet horizon, cette filière a émergé et progressé. Elle contribue significativement à la production de carburants liquides. En parallèle, les biocarburants conventionnels sont en léger recul principalement en raison d'une réduction (surface et rendement) des cultures oléagineuses (colza, tournesol).

USAGES ÉNERGÉTIQUES

À l'instar des autres scénarios prospectifs, **la biomasse valorisée par la filière méthanisation augmente fortement**. Pour ce faire, l'ensemble des ressources agricoles sont mobilisées (biomasses végétales, animales et déchets). Ainsi, ce scénario se traduit, comparativement à la situation actuelle, par un rééquilibrage entre les différents types de biomasses valorisés (agricoles, sylvicoles, autres) et aboutit à un niveau de consommation de biomasse de 255,7 TWh pour l'ensemble des usages énergétiques (+ 74 % comparativement au niveau de consommation de 2017).

Graphique 9 Consommation de biomasse (TWh) pour les usages énergétiques en 2050 dans le scénario tendanciel



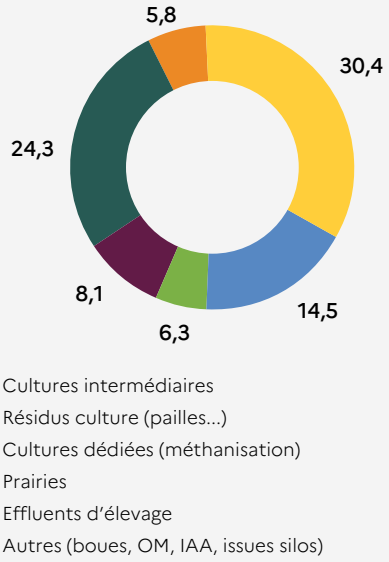
OM : ordures ménagères.

La structure des approvisionnements des unités de méthanisation évolue légèrement *(Graphique 10)* : les gisements « piliers » sont les effluents d'élevage et les cultures intermédiaires, de l'ordre de 30 % des intrants pour chacun d'eux. En complément, sont mobilisés des cultures énergétiques, des surplus issus des prairies permanentes ou temporaires et des résidus de cultures (pailles, menues pailles). Les cultures énergétiques restent présentes dans ce scénario (~ 7 % en tonnage des intrants), ce qui représente cependant une multiplication par 5 des quantités mobilisées.

Les voies de valorisation de la méthanisation évoluent radicalement avec une filière d'injection de biométhane très majoritaire (près de 95 % des installations) et une filière en cogénération restreinte à des unités de méthanisation à la ferme pour des besoins bien spécifiques (bâtiments d'élevage, chauffage).

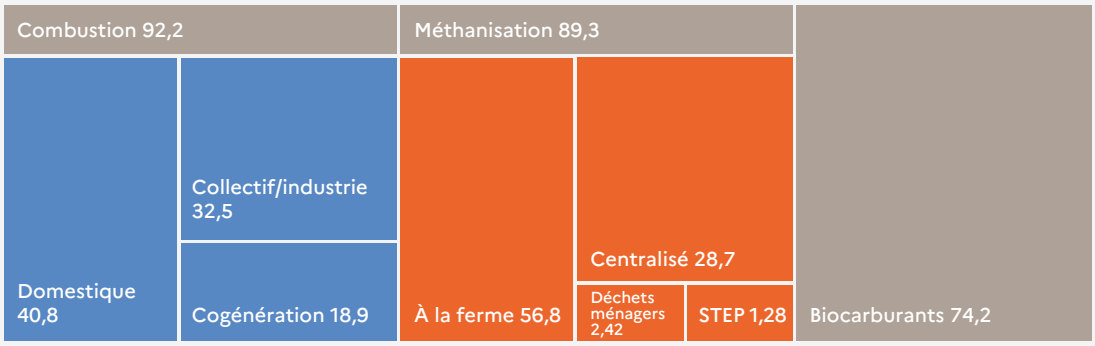
Par conséquent, d'un point de vue valorisation énergétique, l'ensemble des biomasses participent à peu près à la même hauteur aux usages bois énergie (combustion), méthanisation et biocarburants *(Figure 3)*. On notera que la part de la méthanisation en énergie est plus faible que celle exprimée en tonnage du fait principalement d'un moindre contenu énergétique des effluents d'élevage comparativement à la biomasse solide.

Graphique 10 Approvisionnement des unités de méthanisation (TWh) en 2050 dans le scénario tendanciel



OM : ordures ménagères.

Figure 3 Consommation de biomasse (TWh) par usage énergétique en 2050 dans le scénario tendanciel



STEP : stations d'épuration des eaux résiduaires.

3.2. Scénario 1: une mobilisation raisonnée de la ressource forestière

Ce scénario est guidé par une demande énergétique globale (tous secteurs confondus) en forte baisse dans le cadre d'une politique de sobriété à l'échelle nationale aussi bien d'un point de vue énergétique que d'un point de vue consommation alimentaire. Cependant, la consommation de biomasse pour les usages non alimentaires croît fortement et atteint 104 MtMS (+ 105 % comparativement à l'année 2017) afin de valoriser une ressource renouvelable, potentiellement disponible et locale, ainsi que de contribuer à la réduction de la consommation d'énergies fossiles.

HYPOTHÈSES STRUCTURANTES ET ARTICULATION DES USAGES

Concernant les produits bois, bien que la récolte de bois en forêt reste constante (par rapport au niveau 2017) et que le bois hors forêt (haies, vergers, bois de récupération) augmente légèrement (+ 15 %) notamment en raison du développement de l'agroforesterie, on observe une augmentation importante de leurs productions soit + 30 % pour les produits de sciage, + 45 % pour les panneaux *(Graphique 11)*. Ces augmentations permettent d'accroître l'utilisation des produits bois dans les chantiers de construction et de rénovation du bâtiment.

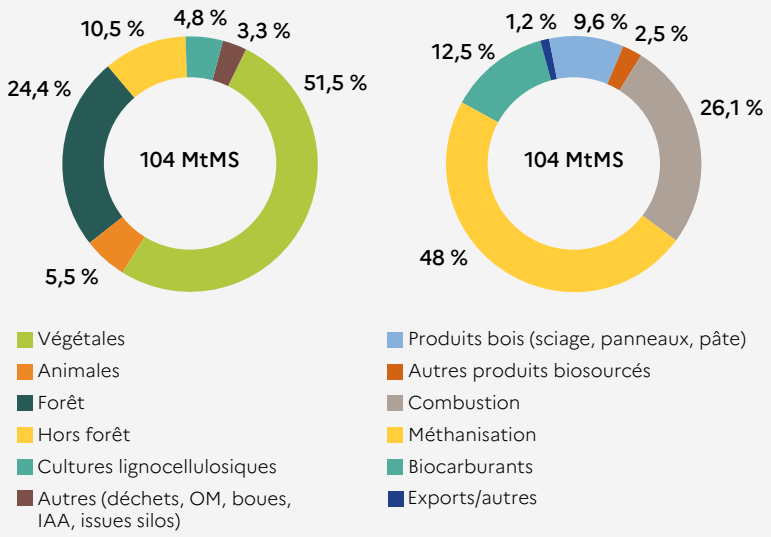
A contrario, la production de pâte à papier primaire (à partir de bois d'industrie) diminue fortement de 30 % alors que la production de pulpe de papier recyclée augmente de 20 % *(Graphique 12)*.

Ces différentes évolutions sont la résultante de :

- **une réduction par 2** des exports de bois d'œuvre (feuillus et résineux) ;
- **une requalification de 25 %** du bois d'industrie feuillus en bois d'œuvre pour une valorisation en produits bois (ameublement, construction, rénovation) permise par des innovations et ce aussi bien sur les filières de transformation de cette ressource que sur leurs valorisations dans le bâtiment ;
- **une intégration croissante** des déchets bois au sein des procédés de production de panneaux (priorité à la valorisation matière pour la valorisation des déchets).

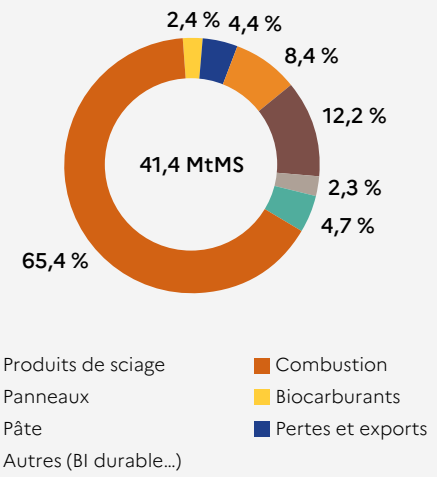
La demande de produits en bois combinée à ces usages bois énergie élevés aboutissent à la consommation de la quasi-totalité de la biomasse lignocellulosique disponible.

Graphique 11 Répartition massique de la biomasse valorisée par catégorie de biomasse et par usage en 2050 dans S1



OM : ordures ménagères.

Graphique 12 Répartition massique des biomasses lignocellulosiques par usage en 2050 dans S1



USAGES ÉNERGÉTIQUES

La consommation globale de biomasse pour une valorisation énergétique est de 289,3 TWh, soit près du double de la consommation estimée en 2017.

Toutes les biomasses sont mobilisées avec un développement important des ressources agricoles, très majoritairement pour un usage en méthanisation *(Graphique 13)*.

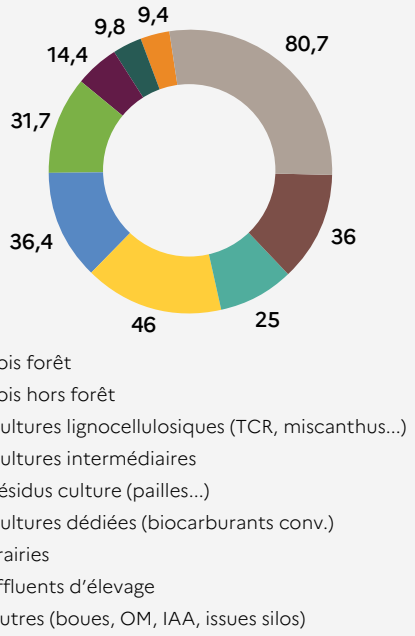
La demande en bois énergie (combustion) augmente fortement et atteint près de 140 TWh. La demande est tirée par le secteur collectif/industrie (+ 85 %) alors que la demande du secteur résidentiel reste constante. Par conséquent, et en lien avec une valorisation matériaux du bois en augmentation (comparativement aux gisements disponibles), l'introduction de cultures lignocellulosiques (type miscanthus et switchgrass) sur une superficie de 500 kha est nécessaire pour répondre notamment à ces différents besoins.

En complément, la méthanisation se développe largement avec la généralisation des couverts intermédiaires en grandes cultures, la mobilisation des résidus de culture et des surplus d'herbes (issus des prairies). Les effluents d'élevage, bien que toujours présents dans les intrants des méthaniseurs, se limitent à 10 % des quantités (en énergie primaire) en raison d'une forte réduction du cheptel (- 24 % en lien avec l'évolution du régime alimentaire) et d'un taux de mobilisation de cette ressource (20 %) qui reste faible en raison d'un élevage plus extensif et d'un allongement de la durée de pâturage. À l'inverse, et en lien avec les évolutions précédentes sur les cheptels, les gisements de pailles disponibles pour un usage en méthanisation augmentent du fait de besoins en litière animale moins importants.

Les intrants des unités de méthanisation sont très majoritairement issus de la biomasse végétale *(Graphique 14)* avec plus des ¾ qui sont des cultures intermédiaires, des résidus de culture (pailles) et des surplus de prairies (permanentes et temporaires). Les cultures intermédiaires s'implantent sur l'ensemble des zones de grandes cultures (céréales, oléoprotéagineux) avec un taux de mobilisation de 25 %. Ce taux s'explique par d'éventuels échecs à la levée des cultures, de trop faibles rendements pour envisager leur récolte et le retour au sol d'une partie des cultures. Les rendements sont en moyenne de 6 tMS/ha, en lien avec les systèmes majoritaires de culture à très bas niveau d'intrants de synthèse déployés dans ce scénario.

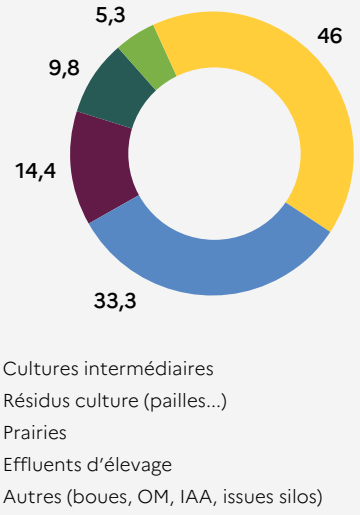
Près de 110 TWh de biomasse sont valorisés en méthanisation avec des installations majoritairement à la ferme et une quasi-généralisation de la valorisation du biométhane produit *via* l'injection dans le réseau de gaz *(Figure 4)*.

Graphique 13 *Consommation de biomasse (TWh) pour les usages énergétiques en 2050 dans S1*



OM : ordures ménagères.

Graphique 14 *Approvisionnement des unités de méthanisation (TWh) en 2050 dans S1*



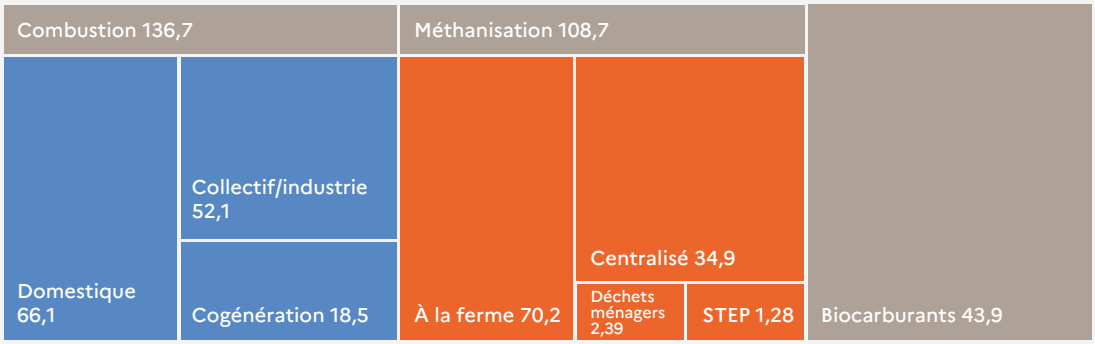
OM : ordures ménagères.

Spécifiquement pour les carburants liquides issus de biomasse, la filière des biocarburants conventionnels est très majoritaire (comparativement aux filières des biocarburants avancés). Cela est la résultante de différents facteurs :

- **disponibilité des biomasses végétales** pour une valorisation par cette filière ;
- **faible déploiement de la filière biocarburants avancés** en raison d'une maturité technico-économique moyenne ;
- **une disponibilité additionnelle** modérée de biomasses lignocellulosiques ;
- **une filière biocarburant à partir de ressources algales** qui n'a pas réussi à émerger.

Ainsi, pour les usages énergétiques de la biomasse, priorité est donnée dans ce scénario à une valorisation en combustion (notamment comparativement à la filière des biocarburants avancés) pour répondre à une demande en forte croissance.

Figure 4 *Consommation de biomasse (TWh) par usage énergétique en 2050 dans S1*



STEP : stations d'épuration des eaux résiduaires.

3.3. Scénario 2 : une mobilisation raisonnée des ressources végétales et forestières

Ce scénario s'inscrit dans une démarche concertée d'évolution de l'offre et de la demande. À ce titre, la mise en œuvre d'opérations de sobriété et la recherche d'une efficacité optimale sont menées conjointement.

La consommation de biomasse pour une valorisation non alimentaire est légèrement supérieure à celle du scénario précédent (~ 107 MtMS) avec une mobilisation équivalente entre les biomasses agricoles et celles lignocellulosiques *(Graphique 15)*. À l'image du scénario précédent, des cultures lignocellulosiques sont implantées sur le territoire (sur des terrains agricoles libérés) et le gisement de bois hors forêt croît en raison d'un déploiement conséquent de l'agroforesterie.

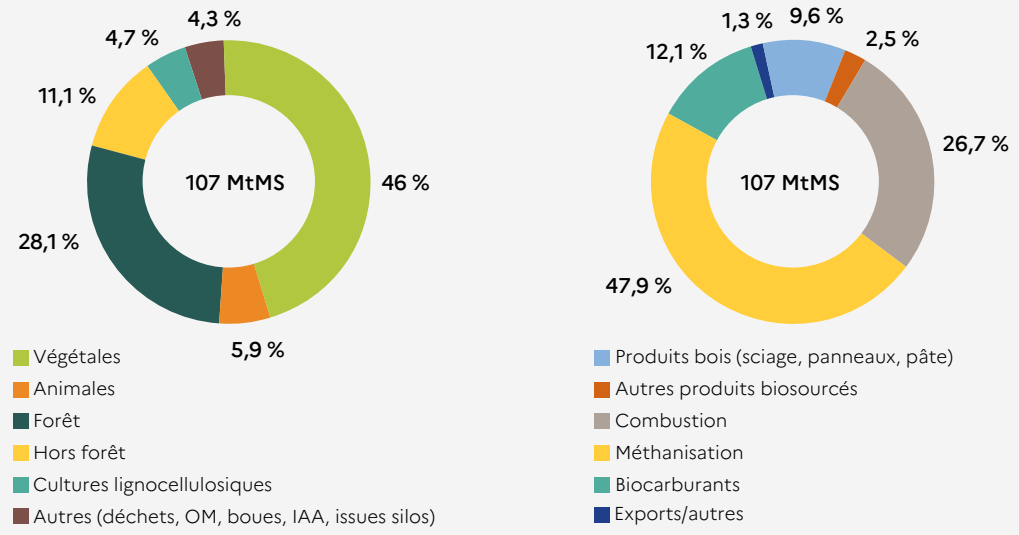
La valorisation matériau est prioritaire dans ce scénario afin notamment de permettre une offre de produits bois (sciage et panneaux) conséquente, notamment pour la construction et rénovation de bâtiments résidentiels et tertiaires.

HYPOTHÈSES STRUCTURANTES ET ARTICULATION DES USAGES

Les gisements et usages de la biomasse sont la résultante des dynamiques suivantes :

- **un scénario d'augmentation de la récolte de bois en forêt** liée à des dynamiques de gestion sylvicole modérées ;
- **une augmentation du gisement de bois hors forêt** principalement due au développement de l'agroforesterie dans les cultures ;
- **une demande de produits bois en forte hausse** (+ 37 % sur les produits de sciage, + 60 % sur les panneaux de bois) qui nécessite d'orienter les déchets bois vers une valorisation des matériaux. Le besoin de bois pour la production de pâte à papier (pulpe primaire) diminue fortement (- 75 %, en raison d'une production en forte croissance de pulpes de papier recyclées). Le bois d'industrie est orienté vers les panneaux ;
- **la demande en bois énergie augmente** globalement (+ 30 %) avec de fortes disparités entre secteurs. La demande du secteur résidentiel diminue légèrement (- 18 %) tandis que celle du secteur collectif/industrie croît très fortement (+ 127 %) ;
- **les volumes de biomasses agricoles et de déjections d'élevage valorisées** par la filière méthanisation augmentent. Le cheptel (bovin, ovin, porcin, volaille…) diminue de près de 15 % (avec de fortes disparités : - 50 % pour les bovins, + 20 % pour les volailles) avec le large déploiement de la conduite des élevages à l'herbe extensifs. Par conséquent, le taux de mobilisation de cette ressource reste modéré (20 %). Les cultures intermédiaires se développent sur l'ensemble des zones de grandes cultures. Le gisement de ces cultures est de l'ordre de 19 MtMS en raison d'un taux de mobilisation de 25 % et de rendements

Graphique 15 Répartition massique de la biomasse valorisée par usage non alimentaire et par catégorie de biomasse en 2050 dans S2



OM : ordures ménagères.

modérés (6 tMS/ha) en lien avec les systèmes de culture déployés dans ce scénario (systèmes à très bas niveau d'intrants de synthèse majoritaires).

Globalement, sur les ressources lignocellulosiques, ce scénario se caractérise par une valorisation importante en bois énergie et en matériaux (produits de sciage et panneaux de bois), ainsi qu'une filière biocarburant avancé en croissance *(Graphique 16)*.

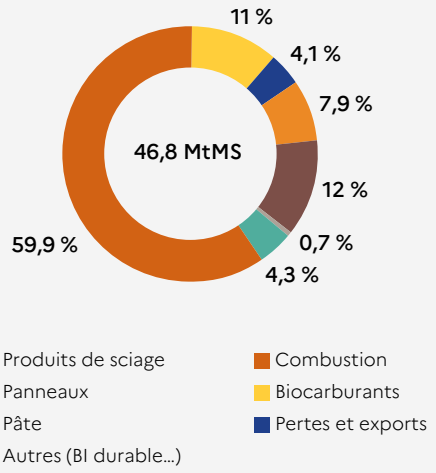
USAGES ÉNERGÉTIQUES

Pour les usages énergétiques, l'ensemble des biomasses est mobilisé avec des gisements en croissance. De plus, la diversification des ressources disponibles est largement valorisée *(Figure 5)*.

La valorisation par combustion reste la voie prioritaire, tandis que la méthanisation maintient un niveau croissant de consommation de biomasse. En complément, la filière des biocarburants avancés se déploie et devient la filière majoritaire (pour la production de biocarburants), profitant à la fois de biomasses lignocellulosiques disponibles et d'une réduction des cultures végétales (betterave, céréales, colza) dédiées à cette production de carburants liquides.

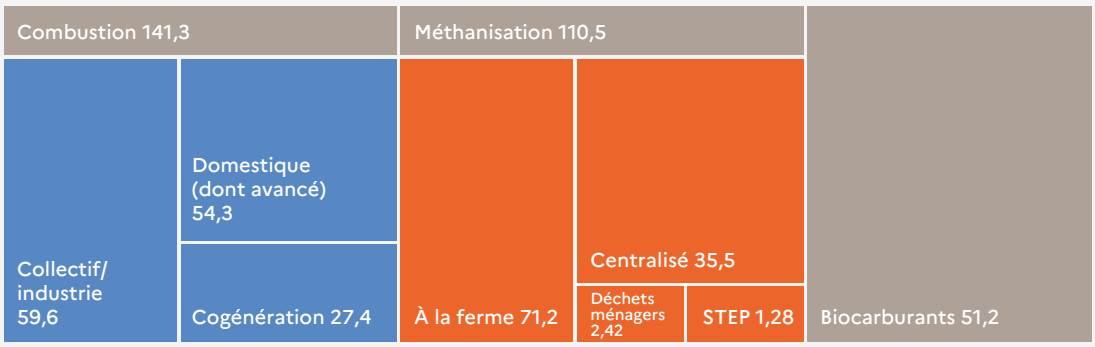
Ainsi, la consommation globale de biomasse, pour une valorisation énergétique, est de 302,9 TWh soit plus du double de la consommation estimée en 2017.

Graphique 16 Répartition massique des biomasses lignocellulosiques par usage en 2050 dans S2



OM : ordures ménagères.

Figure 5 Consommation de biomasse (TWh) pour les usages énergétiques en 2050 dans S2



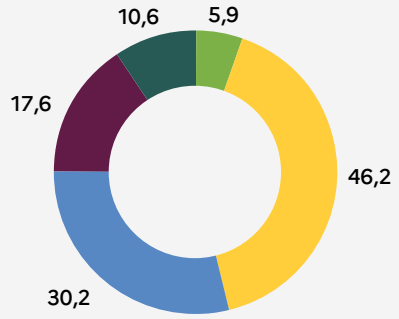
STEP : stations d'épuration des eaux résiduaires.

La structure des approvisionnements des unités de méthanisation évolue largement : les gisements « piliers » sont les cultures intermédiaires, les résidus de culture, les surplus de prairies et dans une moindre mesure les effluents d'élevage *(Graphique 17)*.

Les voies de valorisation de la méthanisation évoluent radicalement avec une filière d'injection de biométhane très majoritaire (près de 95 % des installations) et une filière en cogénération restreinte à des unités de méthanisation à la ferme pour des besoins bien spécifiques (bâtiments d'élevage, chauffage).

Le développement des biocarburants avancés valorise les ressources lignocellulosiques (cultures lignocellulosiques très majoritairement). En effet, le niveau de consommation de bois énergie et le niveau de récolte de bois permettent d'orienter une partie de la biomasse lignocellulosique vers la filière biocarburants. À cet horizon, la filière des biocarburants avancés a atteint un niveau de maturité technico-économique suffisant et contribue majoritairement à la production de biocarburants. En parallèle, les biocarburants conventionnels sont en léger recul principalement en raison d'une réduction (surface et rendement) des cultures oléagineuses (colza, tournesol) et céréalières.

Graphique 17 *Approvisionnement des unités de méthanisation (TWh) en 2050 dans S2*



- Cultures intermédiaires
- Résidus culture (pailles...)
- Prairies
- Effluents d'élevage
- Autres (boues, OM, IAA, issues silos)

OM : ordures ménagères.

3.4. Scénario 3 : une consommation de biomasse maximale pour des usages multiples

Ce scénario s'inscrit dans une dynamique d'évolution par l'offre, avec un déploiement important de solutions innovantes pour répondre aux enjeux de développement des énergies renouvelables. L'enjeu pour la biomasse est de maximiser le gisement utilisable afin de proposer une offre et des usages nombreux en volume et en diversité au regard d'une demande qui reste à un niveau élevé. À ce titre, la consommation de biomasse pour des valorisations non alimentaires est maximale et atteint 129 MtMS (+ 151 % comparativement à 2017), tous usages confondus.

Les ressources disponibles, qu'elles soient agricoles (dont des cultures énergétiques), lignocellulosiques (dont des cultures lignocellulosiques) issues de la forêt ou hors forêt, issues des industries agroalimentaires, ou nouvelles (algues), sont au plus haut et sont valorisées pour des usages matériaux et énergétiques *(Graphique 18)*.

HYPOTHÈSES STRUCTURANTES ET ARTICULATION DES USAGES

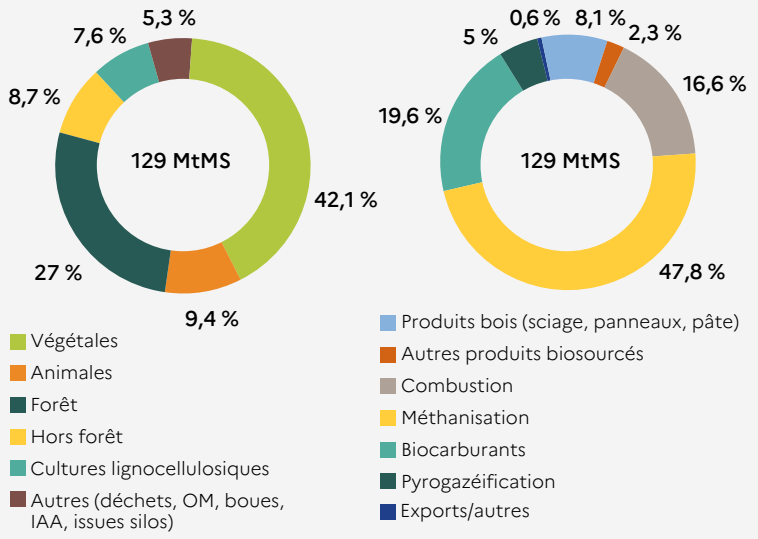
Du point de vue de l'offre, la récolte de bois en forêt augmente nettement (+ 56 %) dans le cadre d'un scénario d'intensification (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*). Les gisements tels que les déchets bois sont davantage orientés vers une valorisation énergétique (scénario priorité à la valorisation énergétique des déchets bois) afin de contribuer significativement à la production de biocarburants et de biométhane (par pyrogazéification) *(Graphique 19)*.
Concernant les ressources agricoles, végétales et animales, les gisements sont fortement augmentés avec d'importants volumes de ressources végétales (cultures intermédiaires, résidus, surplus prairies), des effluents d'élevage importants et mobilisables (cheptel en réduction mais avec un taux de mobilisation de 35 % du gisement maximal) et en complément l'implantation de cultures énergétiques dédiées (maïs principalement).

Globalement, ce scénario traduit une volonté de maximiser la valorisation énergétique de la biomasse en faisant appel à l'ensemble des ressources, voire en introduisant de nouvelles cultures (sur des espaces libérés par l'agriculture, sans pour autant entrer en concurrence directe avec une valorisation alimentaire). Des nouvelles biomasses (algues notamment) sont également valorisées dans ce scénario pour la production de biocarburants.

USAGES ÉNERGÉTIQUES

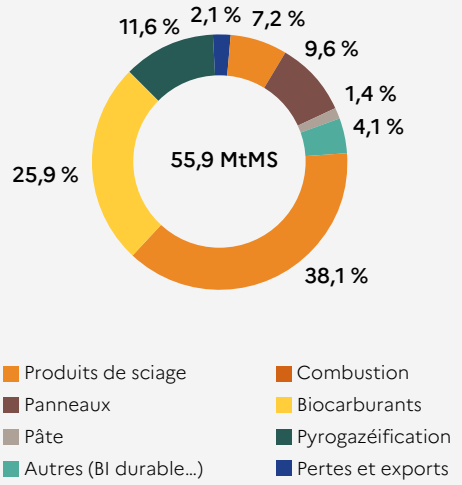
Pour les usages énergétiques de la biomasse, ce scénario se caractérise par le développement conjoint de cultures lignocellulosiques et de cultures dédiées (maïs principalement). Ces dernières sont valorisées en méthanisation *(Graphique 20)* tandis que les cultures lignocellulosiques permettent une croissance impor-

Graphique 18 Répartition massique de la biomasse valorisée par catégorie de biomasse et par usage en 2050 dans S3



OM : ordures ménagères.

Graphique 19 Répartition massique des biomasses lignocellulosiques par usage en 2050 dans S3



tante de la filière biocarburants avancés et l'émergence d'une filière de pyrogazéification pour injection de méthane.

Ainsi, la consommation globale de biomasse, pour une valorisation énergétique, est de 382,3 TWh (+151 % comparativement à la consommation estimée en 2017).

La demande en bois énergie, et par conséquent la consommation de biomasse dédiée, est stable comparativement à 2017. Cette évolution cache cependant deux dynamiques contraires : une réduction forte des besoins en bois énergie pour le secteur domestique (- 37 %) compensée par une hausse équivalente de la demande du secteur collectif/industrie.

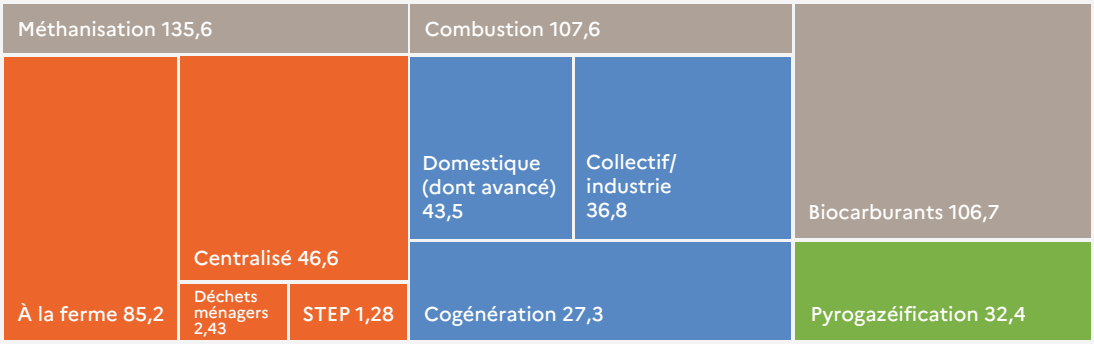
Cette mobilisation importante de biomasse permet le développement de la filière méthanisation avec des installations réparties globalement pour ⅔ à la ferme et pour ⅓ centralisées. Ce déploiement est très largement valorisé *via* l'injection dans le réseau du biométhane produit.

En parallèle, la filière biocarburants progresse fortement *(Figure 6)*. avec comme leader les biocarburants avancés. Des innovations importantes sur cette technologie permettent de valoriser près de 75 TWh de biomasses lignocellulosiques. Les biocarburants conventionnels, bien qu'en décroissance, viennent compléter cette offre de carburants liquides.

Enfin, la technologie de pyrogazéification pour injection de méthane s'est développée et a atteint un stade de maturité suffisant. Elle permet ainsi la valorisation en priorité des déchets bois et des liqueurs noires issus du secteur papetier.

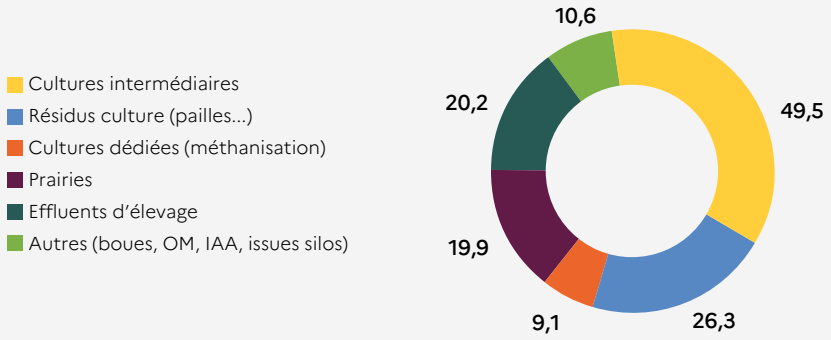
De façon transversale, le gisement de ressources lignocellulosiques valorisé (tous usages confondus, hors alimentaire) maximal dans ce scénario atteint plus de 55,9 MtMS. Les usages énergétiques sont ciblés en priorité avec, par ordre décroissant, les usages combustion, biocarburants et pyrogazéification.

Figure 6 Consommation de biomasse (TWh) pour les usages énergétiques en 2050 dans S3



STEP : stations d'épuration des eaux résiduaires.

Graphique 20 Approvisionnement des unités de méthanisation (TWh) en 2050 dans S3



OM : ordures ménagères.

3.5. Scénario 4 : une consommation de biomasse tirée par les usages énergétiques

Ce scénario répond à une logique orientée marchés et pour laquelle la dimension économique pilote les choix d'articulation des usages. La consommation de biomasse (toutes valorisations confondues, hors alimentation) reste élevée et atteint 125,4 MtMS, avec cependant des disparités selon les ressources ciblées et les voies de valorisation permises *(Graphique 21)*.

HYPOTHÈSES STRUCTURANTES ET ARTICULATION DES USAGES

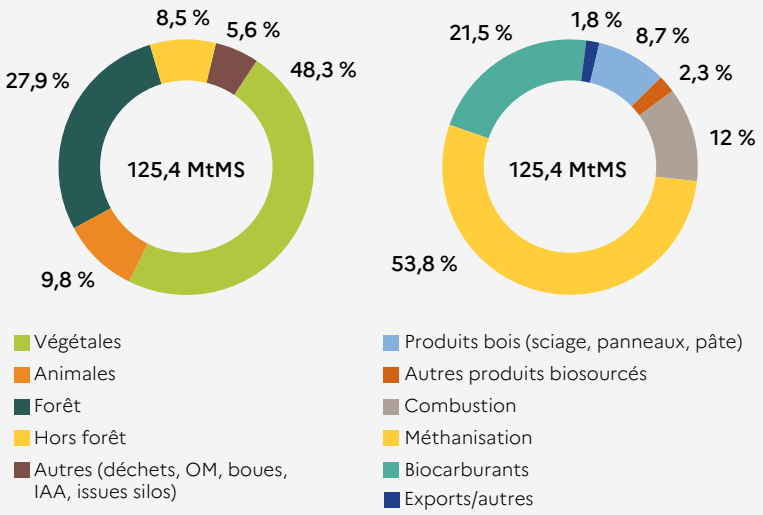
La demande en produits bois (sciage, panneaux et pâte) reste modérée *(Graphique 22)* comparativement à la hausse de la récolte du bois en forêt, hausse qui résulte d'une dynamisation de la sylviculture et d'un plan de reboisement avec des plantations productives (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*).

La demande en bois énergie a fortement décru (-29 %) en raison de l'électrification des secteurs collectif/industrie et domestique pour répondre à leurs besoins thermiques. Par ailleurs, la demande en produits bois n'augmente pas fortement en raison de taux d'introduction des produits bois dans la construction et la rénovation des bâtiments modérés.

Ainsi, spécifiquement sur les biomasses lignocellulosiques, leur valorisation est largement orientée vers la filière biocarburants avancés qui s'est développée et a atteint un stade de maturité technologique suffisant pour permettre un déploiement industriel de grande ampleur.

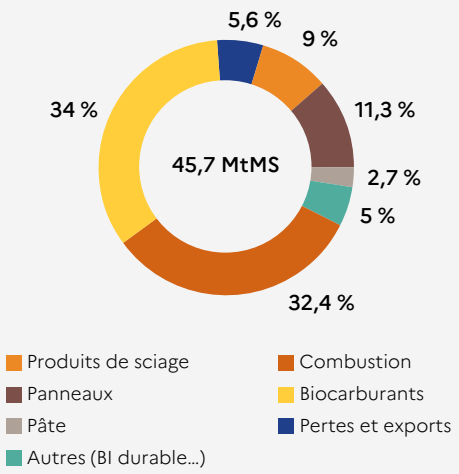
Les biomasses agricoles et végétales sont largement mobilisées et contribuent à la production de biométhane par méthanisation. Comparativement à S3, les biomasses agricoles sont plus fortement mobilisées que les biomasses lignocellulosiques. Les cultures dédiées à des usages énergétiques sont très peu présentes dans ce scénario en raison d'arbitrages technico-économiques qui ne favorisent pas leur implantation, ainsi que d'une demande moins forte (notamment en bois énergie).

Graphique 21 Répartition massique de la biomasse valorisée par catégorie de biomasse et par usage non alimentaire en 2050 dans S4



OM : ordures ménagères.

Graphique 22 Répartition massique des biomasses lignocellulosiques par usage en 2050 dans S4



USAGES ÉNERGÉTIQUES

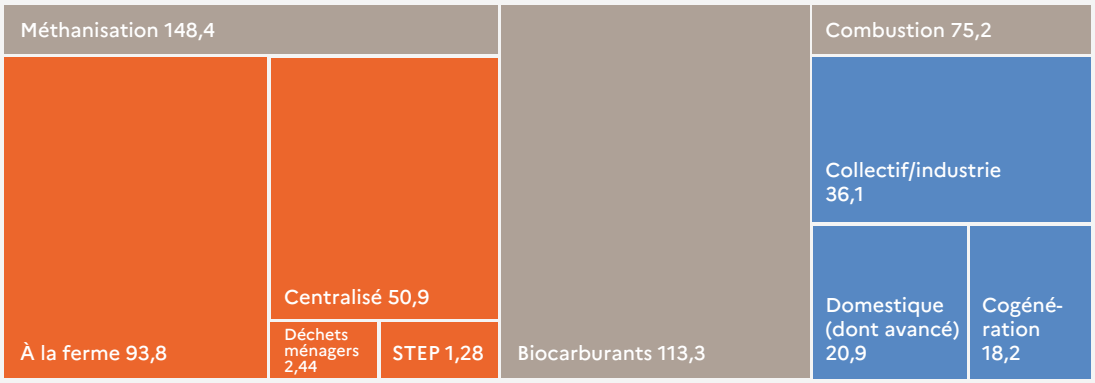
Pour les usages énergétiques, les filières méthanisation et biocarburants représentent la très grande majorité de la consommation de biomasse (~ 260 TWh, soit plus de 75 % de la biomasse valorisée énergétiquement) *(Figure 7)*. Ainsi, la consommation globale de biomasse, pour une valorisation énergétique, est de 336,9 TWh (+ 123 % comparativement à la consommation estimée en 2017).

La méthanisation s'est largement déployée au sein des exploitations agricoles et de dynamiques territoriales collectives. Elle atteint un niveau de consommation de biomasse maximal (148,5 TWh) très largement valorisé *via* de l'injection dans le réseau gaz. Bien qu'encore majoritairement à la ferme, un déploiement légèrement plus important des installations centralisées a lieu. Au total, cela contribue à une production de biométhane de plus de 141 TWh.

Les intrants des unités de méthanisation sont multiples et sont, par ordre décroissant *(Graphique 23)* :

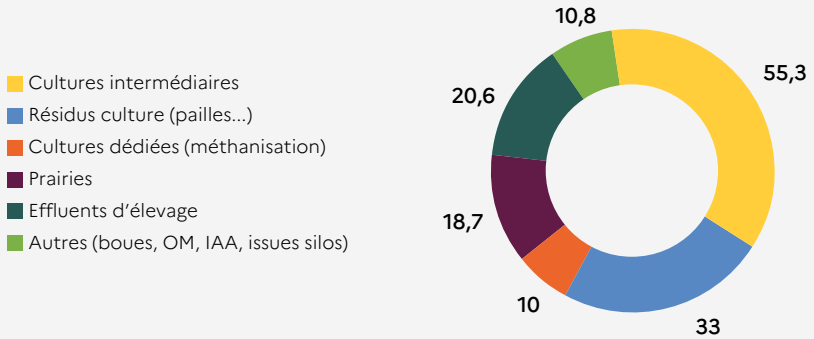
- **les cultures intermédiaires** qui, semées sur l'ensemble des grandes cultures, représentent la part d'intrants la plus importante (37 %). Leur taux de mobilisation est de 25 % avec un rendement moyen de 8 tMS/ha atteint grâce à des pratiques permettant raisonnablement la fertilisation minérale et l'irrigation en conditions limitantes sur l'étape de levée notamment ;
- **les résidus de culture** (24 %) qui permettent de valoriser les pailles et menues pailles disponibles en tenant compte des contraintes agronomiques de restitution au sol, des contraintes techniques et des autres voies de valorisation (litière notamment) ;
- **les effluents d'élevage** (14 %) avec un cheptel en légère hausse (+ 8 %) et une conduite des élevages encore majoritairement en bâtiments qui permet un taux de mobilisation de cette ressource important (35 %) ;
- **la mobilisation d'autres gisements** tels que les surplus de prairies (12 %), les coproduits des IAA, les biodéchets issus de collectes dédiées, les algues…

Figure 7 Consommation de biomasse (TWh) par usage énergétique en 2050 dans S4



STEP : stations d'épuration des eaux résiduaires.

Graphique 23 Approvisionnement des unités de méthanisation (TWh) en 2050 dans S4



OM : ordures ménagères.

4. Une mobilisation croissante de la biomasse dans tous les scénarios

Selon les scénarios, les différents leviers que sont le niveau de mobilisation des biomasses, les interactions entre usages matériaux et usages énergétiques, ainsi que les usages énergétiques privilégiés sont actionnés plus ou moins fortement, ou permettent de donner la priorité à certaines voies de valorisation. Le *Tableau 5* présente qualitativement les leviers mobilisés pour les différents scénarios.

Tableau 5 Leviers mobilisés dans les différents scénarios

		TEND	S1	S2	S3	S4
Consommation de biomasse	Toutes biomasses	+	++	++	++++	+++
	Biomasses lignocellulosiques	+	+	++	+++	++
	Ressources agricoles	+	++	+	+++	+++
Valorisation de la biomasse	Effort vers usages produits biosourcés	++	+++	+++	++	+
	Méthanisation	+	++	++	+++	+++
	Combustion	++	+++	+++	++	+
	Biocarburants	++	+	+	+++	+++
	Pyrogazéification	-	-	-	+	-

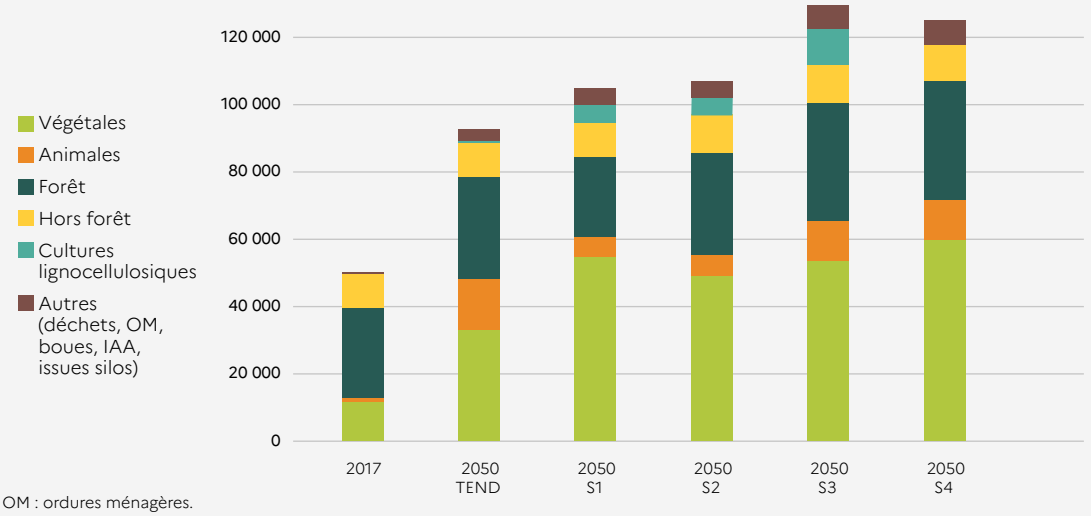
4.1. Consommations de biomasse

Pour l'ensemble des scénarios, la consommation de biomasse est très largement supérieure à celle de 2017, avec en priorité une mobilisation forte des biomasses végétales (et des cultures lignocellulosiques dans S1, S2 et S3). Hormis pour le scénario tendanciel, le volume de biomasse mobilisée dépasse les 100 MtMS et fait de cette ressource un « pilier » dans tous les scénarios.

Les scénarios se différencient également par leur capacité à augmenter (ou réduire) le puits de carbone agricole et forestier (le puits est plus conséquent dans les scénarios limitant les prélèvements), comme cela est détaillé dans le chapitre *2.4.3. Puits de carbone (Graphique 24)*.

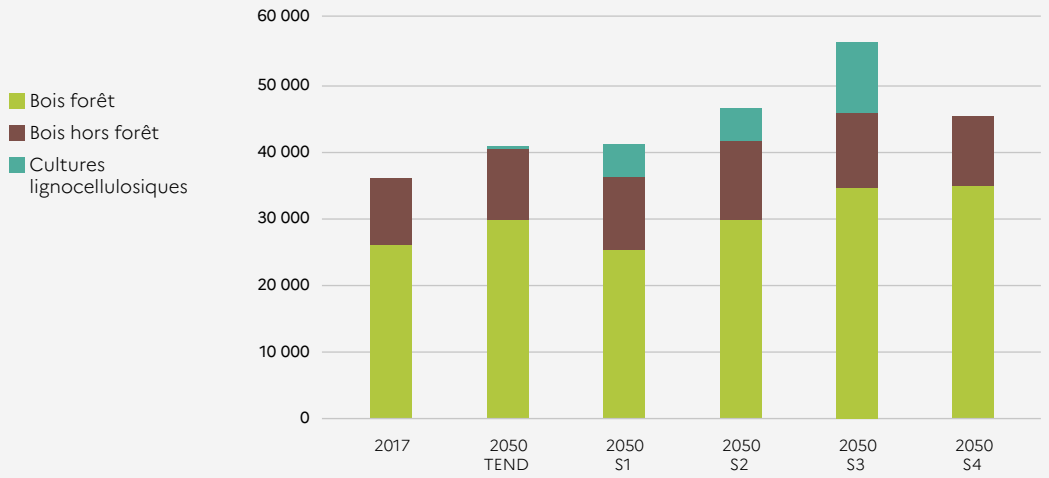
Sur les ressources lignocellulosiques, la comparaison des scénarios permet de mettre en évidence leur forte mobilisation dans S3 (notamment en raison de cultures lignocellulosiques) et d'identifier les usages privilégiés pour chacun des scénarios : usage biocarburants important pour S3 et S4 (*Graphique 25* et *Graphique 26*).

Graphique 24 *Consommation de biomasse tous usages non alimentaires confondus en ktMS dans chaque scénario*

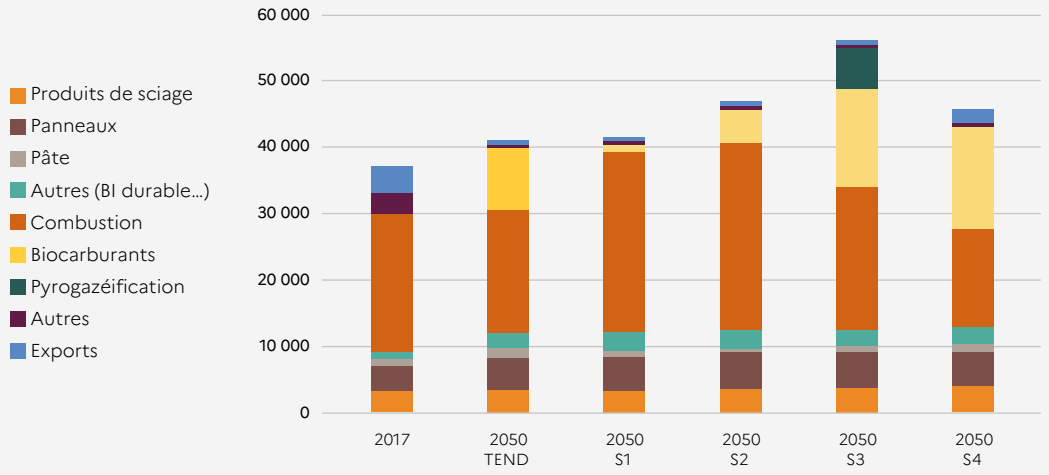


OM : ordures ménagères.

Graphique 25 *Consommation de biomasses lignocellulosiques en ktMS par catégorie tous usages confondus*



Graphique 26 *Consommation de biomasses lignocellulosiques en ktMS par usage*



4.2. Usages matière

Concernant les usages matière de la biomasse, le *Graphique 27* présente un comparatif des scénarios. Même si, en valeur absolue, les scénarios sont peu différenciés avec des volumes de biomasse dédiés à ces usages assez proches, une forte différenciation existe d'un scénario à l'autre en valeur relative (part de la récolte de bois en forêt dédiée à des usages matière). Ainsi, pour S1 et S2, une part plus élevée de la récolte de bois, comparativement à S3 et S4, permet de maintenir notamment une production de produits de sciage et de panneaux élevée *(Tableau 6)*.

Graphique 27 Consommation de biomasses par usage en ktMS

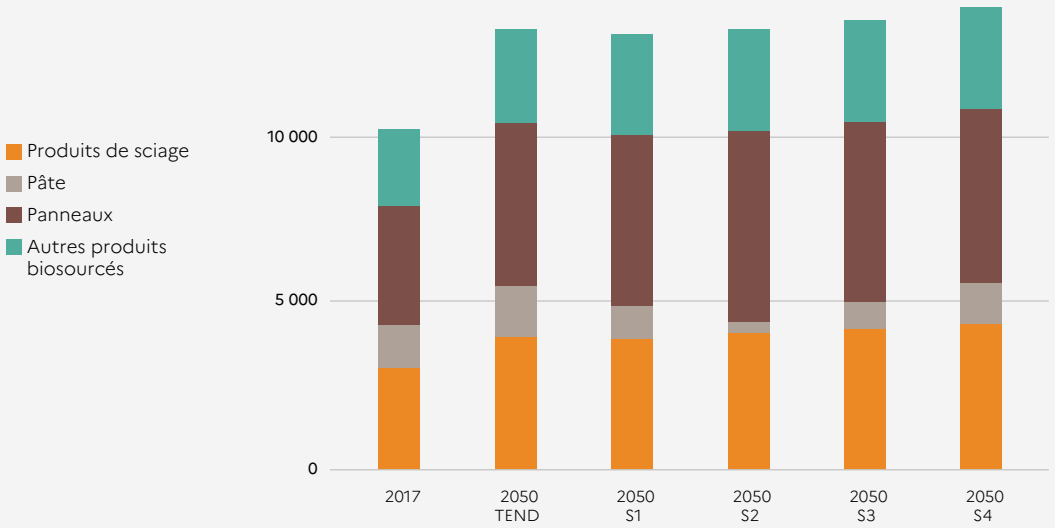


Tableau 6 Part de la récole de bois en forêt pour des usages produits de sciage et panneaux

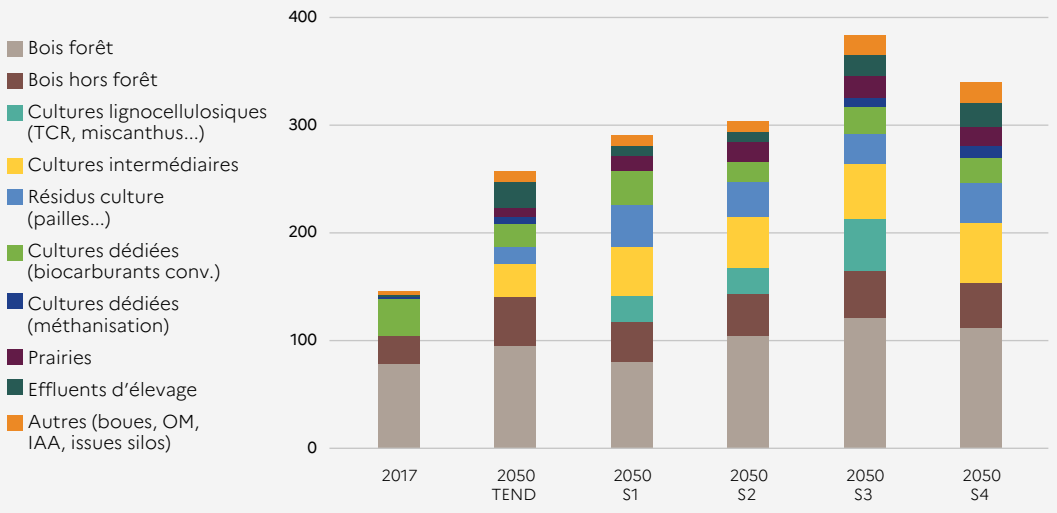
2017	TEND 2050	S1 2050	S2 2050	S3 2050	S4 2050
25,3 %	29,4 %	35 %	32,4 %	27,4 %	27,1 %

4.3. Usages énergétiques

Pour les usages énergétiques de la biomasse, les *Graphique 28* et *Graphique 29* proposent un comparatif des scénarios entre eux selon les familles de ressources mobilisées et selon les voies de valorisation privilégiées. La combustion reste majoritaire pour S1 et S2, tandis que la méthanisation et les biocarburants deviennent les usages privilégiés pour S3 et S4.

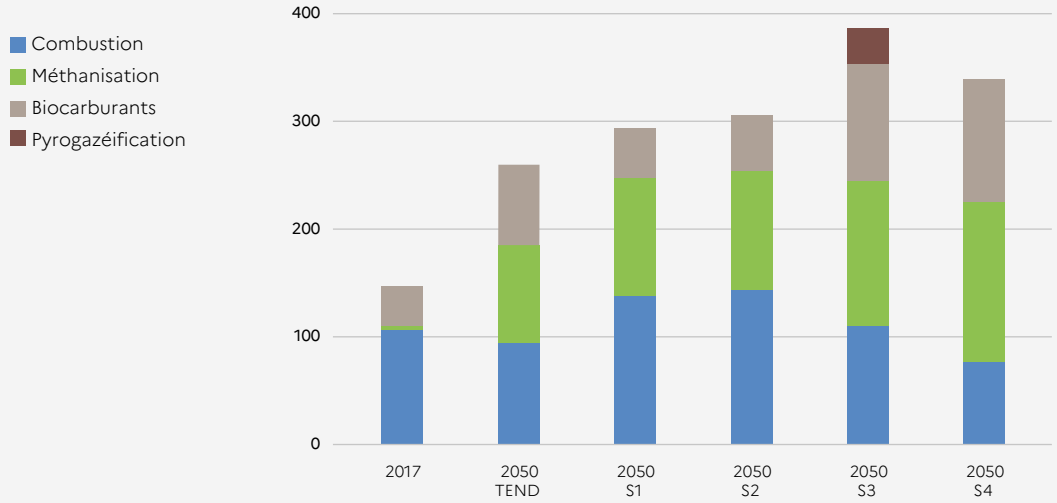
Sur les ressources mobilisées, la multiplication par 2 depuis 2017 est la résultante d'une diversification forte sur les biomasses agricoles valorisées (cultures intermédiaires, résidus de culture, surplus de prairies, effluents). Cette évolution de la ressource mobilisable est par ailleurs dépendante de l'évolution des besoins alimentaires (*cf.* chapitre *2.1.4. Alimentation*) et donc de l'espace disponible pour les autres usages.

Graphique 28 *Consommation de biomasses pour un usage énergétique en TWh (par catégorie de biomasse)*



OM : ordures ménagères.

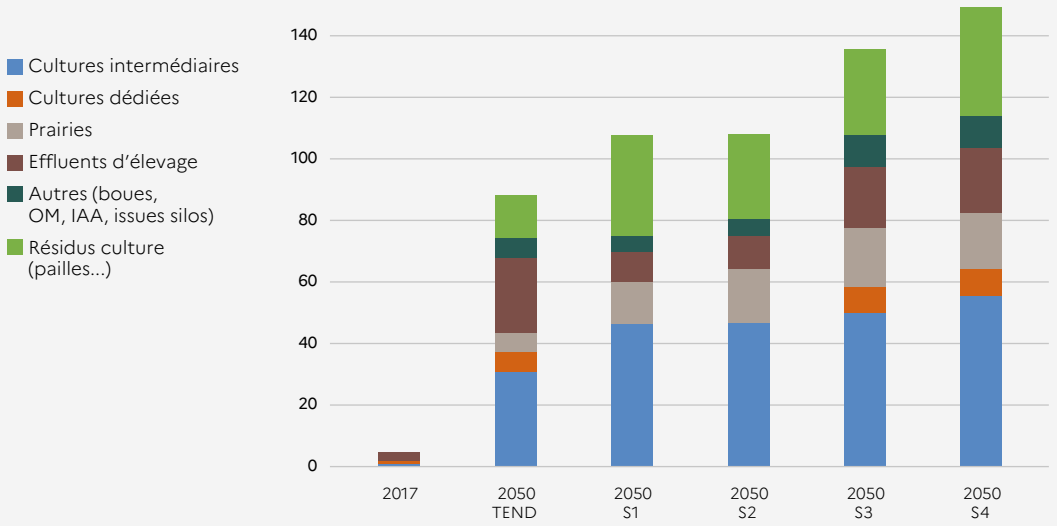
Graphique 29 *Consommation de biomasses par usage énergétique en TWh*



Quel que soit le scénario considéré, la méthanisation est un pilier pour les usages de la biomasse. Les taux de mobilisation des différents gisements (végétaux, animaux, coproduits, algues) et les volumes résultants permettent un niveau de consommation de biomasse élevé (de 89 TWh à 148 TWh). La structure des plans d'approvisionnement évolue légèrement d'un scénario à l'autre au gré de l'évolution des systèmes agricoles et d'élevage, et de la place admise pour des cultures énergétiques *(Graphique 30)*.

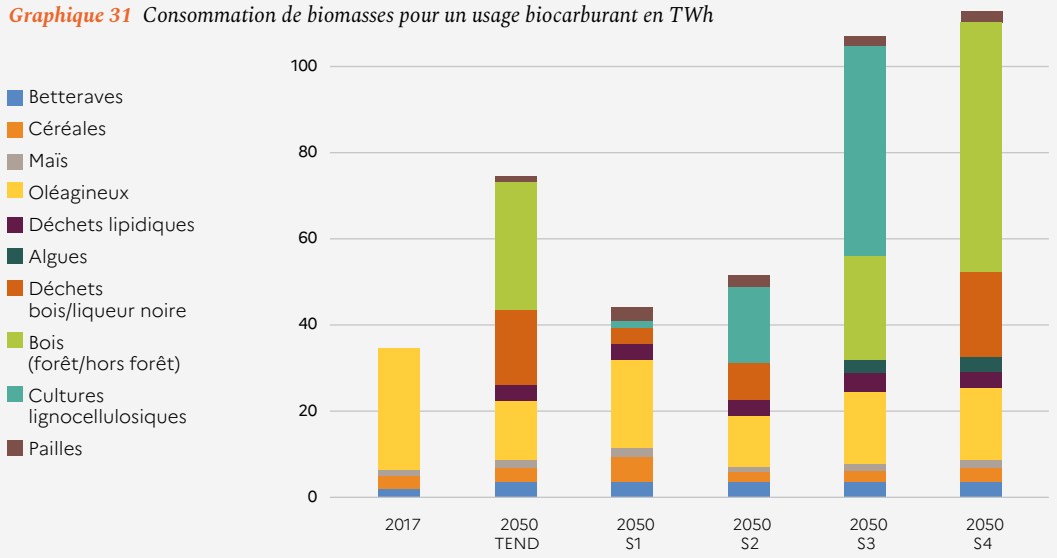
Enfin, les usages biocarburants varient fortement d'un scénario à l'autre selon le niveau de développement et de structuration des filières de biocarburants conventionnels et avancés, ainsi que la disponibilité de biomasses pour cet usage. On observe ainsi une filière des biocarburants avancés largement développée et productrice de carburants liquides pour les scénarios TEND, S3 et S4 (S2 également avec cependant une production limitée en raison de la faible disponibilité de biomasses lignocellulosiques), tandis que la filière des biocarburants conventionnels reste majoritaire pour S1 pour un niveau de production bien plus restreint *(Graphique 31)*.

Graphique 30 *Consommation de biomasses pour un usage en méthanisation en TWh*



OM : ordures ménagères.

Graphique 31 *Consommation de biomasses pour un usage biocarburant en TWh*



5. Le développement de la biomasse doit être envisagé en cohérence avec tous les secteurs concernés

5.1. Des arbitrages à faire entre usages

L'utilisation de la biomasse pour des usages non alimentaires n'est pas nouvelle. Son usage est, jusqu'à présent, largement orienté vers la production de chaleur pour les secteurs domestique, industriel et collectif et vers les produits biosourcés (majoritairement produits bois pour la construction et la rénovation de bâtiments).

Pour les scénarios de cette étude, comme pour les scénarios prospectifs publiés par d'autres acteurs à des échelles nationales, européennes, voire internationales, la biomasse joue un rôle majeur pour la transition écologique et pour le déploiement de filières de produits biosourcés. Les enjeux pour ce secteur sont donc d'augmenter significativement les volumes de biomasses mobilisées, d'accompagner l'articulation de ses usages tout en assurant une gestion durable des écosystèmes forestiers et agricoles, ainsi qu'une politique de protection de la biodiversité.

Cette mobilisation accrue se traduit, quel que soit le scénario considéré, par une consommation de biomasse (hors usages alimentaires) de plus de 100 MtMS, ce qui représente plus du double de notre consommation actuelle. L'enjeu est donc de taille afin d'assurer ce niveau de mobilisation sans pour autant déséquilibrer les écosystèmes et les filières dont sont issues ces biomasses. Ces évolutions potentielles ne peuvent se dissocier des changements concernant les autres usages de la biomasse et sont à analyser avec des approches globales. À titre d'exemple, le potentiel d'espace agricole mobilisable pour ces usages est dépendant de l'évolution du système alimentaire de la population et de son empreinte sol (*cf.* chapitre *2.1.4. Alimentation*). Par ailleurs, le niveau de prélèvement de biomasse a des effets sur les puits de carbone. La contribution de la biomasse à la lutte contre le changement climatique doit donc intégrer ces effets dans un bilan global (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*).

En cohérence avec l'évolution des systèmes agricoles et des pratiques associées, le gisement de biomasses agricoles évolue fortement pour un usage qui reste majoritairement énergétique et plus précisément orienté vers la filière méthanisation. Ces ressources participent ainsi à un déploiement important des unités de méthanisation (à la ferme et centralisées notamment) qui se fait, pour tous les scénarios, en parallèle d'une évolution des systèmes de production agricole. La méthanisation s'insère dans ces systèmes en fonction des services qu'elle apporte aux agriculteurs : valorisation agronomique des digestats, réduction de la fertilisation minérale, meilleure autonomie énergétique, diversification des revenus… Il s'agit d'intégrer au mieux le développement de la méthanisation aux systèmes de production agricole. La consommation de biomasse dédiée à cet usage varie de 89 TWh dans le scénario tendanciel à 148 TWh dans S4 qui maximise cette voie de valorisation grâce à des ressources potentiellement disponibles. L'évolution des cheptels, en lien avec l'évolution des régimes alimentaires, peut fortement affecter les gisements utilisables aussi bien en nombre qu'en système de conduite des élevages.

Par ailleurs, les gisements de biomasses lignocellulosiques sont la résultante de deux facteurs :

- les stratégies sylvicoles mises en œuvre dans chacun des scénarios : d'une politique de maintien du niveau de récolte de bois dans S1 à une politique d'intensification avec plans de reboisement (intégrant des plantations productives) dans S4 (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*) ;
- la mise en place de cultures lignocellulosiques sur des terrains agricoles libérés (déprise agricole).

On aboutit par conséquent, selon le niveau d'activation de ces facteurs, à une consommation de biomasses lignocellulosiques (récolte BO + BI) qui varie de 30 Mm^3 à 42 Mm^3 pour les usages matériaux et de 140 TWh dans S1 à 210 TWh dans S3 dans lequel on observe un déploiement important de telles cultures sur près d'un million d'hectares.

En complément de ces actions sur les ressources disponibles et sur la durabilité de la production, la nécessaire articulation des usages de ces biomasses pour répondre à nos besoins est questionnée et peut varier d'un scénario à l'autre. L'enjeu est d'éviter au maximum les risques de concurrence d'usage, qui suppose dans tous les scénarios un suivi local et une gestion de la ressource.

La première conclusion est que, malgré un niveau de consommation de biomasse largement croissant comparativement à 2017, celle-ci ne peut contribuer simultanément à un déploiement important de l'ensemble des filières, ce qui nécessite des arbitrages. Ainsi, on ne peut imaginer que la biomasse puisse répondre en même temps à un usage bois énergie croissant et à une filière des biocarburants avancés de grande ampleur dans un seul scénario et ce, quelles que soient les politiques de développement agricoles et sylvicoles retenues. Quel que soit le scénario, une priorisation des usages de la biomasse est nécessaire pour optimiser les services visés. On observe par exemple de S1 à S4 une évolution des usages des biomasses lignocellulosiques de la combustion vers la production de biocarburants.

La seconde conclusion est que, selon le scénario considéré, la biomasse peut contribuer plus ou moins à la couverture de nos usages énergétiques. À titre d'exemple, pour le gaz, la biomasse contribue, en produisant du biométhane majoritairement par méthanisation, à couvrir près de la totalité de notre consommation de gaz dans S1 tandis qu'elle ne couvre que la moitié dans S4. Une contribution forte de la biomasse pour répondre à nos besoins passe en priorité par la mise en œuvre d'une politique de sobriété énergétique combinée à des actions d'efficacité énergétique.

5.2. Besoin de politiques publiques structurantes

La mise en œuvre de ces scénarios suppose des politiques dédiées à la structuration de l'offre biomasse tant dans le secteur agricole que forestier tout en renforçant les critères de durabilité pour ces productions. Le potentiel de ressource biomasse mobilisable est conditionné à des évolutions de pratiques et de systèmes de production. La réalisation de chacun des scénarios est sous-tendue par des dispositifs dédiés (incitatifs, règlementaires…). Ils auront comme objectif d'augmenter, plus ou moins fortement, les gisements de biomasse disponibles : mise en œuvre de couverts végétaux en intercultures, développement de l'agroforesterie, augmentation de la récolte de bois en forêt, stratégie de valorisation des déchets bois…

Quel que soit le scénario, une priorisation des usages de la biomasse est nécessaire pour optimiser les services visés au regard des ressources disponibles.

Ces politiques de structuration de la ressource sont par ailleurs indispensables pour s'assurer que l'évolution des usages de la biomasse soit en cohérence avec la préservation des écosystèmes, notamment de la biodiversité, et soit par ailleurs adaptée aux enjeux d'adaptation au changement climatique. Dans ce contexte, **le renforcement de l'observation des écosystèmes et des pratiques en lien avec l'augmentation des usages de la biomasse est un enjeu majeur** pour garantir la durabilité de la ressource.

Par ailleurs, la complémentarité, l'articulation et la lisibilité à court et moyen terme des politiques publiques qui relèvent du champ de l'agriculture, de la sylviculture et de l'énergie sont autant d'éléments qui conditionneront la réalisation de tel ou tel scénario avec une contribution de l'ensemble des parties prenantes au niveau souhaité.

Enfin, sur les usages énergétiques et dans le cadre de filières matures (méthanisation, combustion) ou encore au stade de démonstration (biocarburants avancés), leur rentabilité et leur pertinence technico-économique est tributaire de trois leviers :

- **une baisse des coûts de production**. Que ce soit pour le gaz ou la chaleur renouvelable, elle est nécessaire par des améliorations, innovations techniques et également par une meilleure valorisation de l'ensemble de leurs produits. Pour les filières les moins matures, un soutien fort à l'innovation (opérations de démonstration, première unité commerciale) est indispensable ces prochaines années pour espérer les niveaux de développement projetés à 2050 (notamment pour S3 et S4) ;
- **l'augmentation à venir du prix du carbone**. Il doit permettre l'accélération de l'utilisation de ressources à plus faible empreinte carbone ;
- **un dispositif de tarif d'achat ou d'aide à l'investissement.** Cela permettra de soutenir leur déploiement à large échelle. À ce titre, le niveau (en montant) et l'orientation (électricité, chaleur, gaz) des tarifs d'achat auront un effet décisif sur l'avenir de ces filières.

LES PRODUITS BIOSOURCÉS : BESOIN DE SOUTIEN POUR RELEVER LES DÉFIS TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES

Au vu de la faible maturité des procédés et du faible taux de pénétration, il a été difficile d'estimer le potentiel des produits biosourcés dans l'atteinte de la neutralité carbone. Pourtant, avec l'arrêt du fossile, les besoins seront probablement importants. Même si l'industrie chimique diminue sa demande et augmente le recyclage, l'approvisionnement en biomasse sera un verrou majeur de la filière. Il semble primordial de soutenir la R&D mais aussi le stade démonstrateur pour aider les nouveaux procédés ou ceux en cours de développement à être commercialisés. Les procédés en cascade sont à favoriser pour exploiter tout le potentiel de la biomasse dans des structures de type « raffinerie ». Les compétences requises pour développer la filière devraient inciter à décloisonner les organismes de recherche spécialisés en agronomie, en chimie et sciences du vivant. La plupart des molécules plateformes oléfines (ethylène, butadiène, etc.) ont leur version biosourcée produites de manière industrielle mais les molécules aromatiques restent difficiles à produire à partir de la biomasse. Des efforts concernant la valorisation de la lignine semblent indispensables à poursuivre pour limiter l'usage du pétrole. Par ailleurs, la composition des molécules biosourcées implique globalement des procédés plus coûteux en énergie pour arriver aux mêmes molécules plateformes utilisées en pétrochimie [22]. La stratégie de substitution des molécules pétrochimiques existantes doit donc être couplée à une stratégie d'innovation avec de nouvelles molécules et de nouveaux procédés.

Comme pour les filières énergétiques, le surcoût de production est l'un des verrous le plus communément observé dans toutes les catégories de produits biosourcés. Ce problème est moins prononcé dans certaines catégories de produits, comme les cosmétiques et les produits de soins personnels, où les consommateurs sont disposés à payer un supplément. Les mesures règlementaires restreignant l'utilisation de produits d'origine fossile en exigeant certains critères de durabilité pourraient créer des marchés pour les produits biosourcés. Il existe actuellement, par exemple, des réglementations visant à imposer l'utilisation de produits biodégradables notamment pour les lubrifiants perdus dans l'environnement [23]. Toutefois, l'absence de mesures générales limitant l'utilisation des ressources fossiles (par exemple, une taxe générale sur le carbone) constitue un obstacle majeur pour certaines catégories de produits, empêchant le développement de leurs versions biosourcées.

La mise en place d'un label unique « biosourcé durable » permettrait de mieux valoriser et faire connaître l'offre de ces produits en facilitant la compréhension des acheteurs. En s'inspirant de la réussite du programme BioPreferred de l'USDA[8], il pourrait être intéressant de mettre en place une politique d'achat public préférentiel des produits biosourcés[9]. La teneur minimale de matière biosourcée devra être propre à chaque catégorie de produits et vérifiée par un tiers indépendant suivant une norme. Par ailleurs, la plus-value environnementale de la solution biosourcée devra être démontrée.

5.3. Des hypothèses fortement dépendantes de l'évolution des pratiques

Les scénarios présentés dans cette partie sont à l'équilibre d'un point de vue des ressources valorisables (en cohérence avec l'évolution des systèmes agricoles et forestiers notamment, et de nos régimes alimentaires) et des usages permis. Ils partent donc d'estimations et d'hypothèses aussi bien sur les gisements disponibles, sur les rendements de conversion, sur le niveau de maturité de filières énergétiques que sur les usages liés à l'horizon 2050. Ces estimations sont donc autant d'incertitudes, voire de limites, quant à la robustesse des scénarios prospectifs.

Côté gisement, sur la ressource bois, d'importants efforts de recherche ont permis d'améliorer les connaissances scientifiques concernant la quantification et l'identification des stratégies forestières d'atténuation du changement climatique. Cependant, des incertitudes restent encore à lever (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*).

Les estimations de bois hors forêt liées à l'agroforesterie ou aux haies bocagères sont conditionnées à la mise en œuvre de ces pratiques agricoles et celles liées aux déchets, à leur récupération et à leur valorisation.

L'incertitude est également liée au gisement en forte augmentation (comparativement à 2017) des biomasses agricoles. En effet, la production ou mobilisation de ces ressources est fonction de facteurs aussi bien agronomiques et climatiques (rendements, gel, grêle…), techniques (opérations de récolte, technologies de valorisation) qu'économiques (valorisation, prix de vente), voire même d'évolution des régimes alimentaires. Les quantités de cultures intermédiaires et résidus de culture (les deux gisements les plus importants pour un usage en méthanisation) pourraient

8 Département américain de l'Agriculture.
9 La LTECV 2015 prévoit déjà l'augmentation des produits biosourcés par les achats publics.

ainsi varier à cet horizon. La sensibilisation, la mobilisation, voire l'intéressement des acteurs du monde agricole représentent des enjeux majeurs pour la disponibilité de ces ressources. Ils portent par conséquent une certaine part d'incertitude.

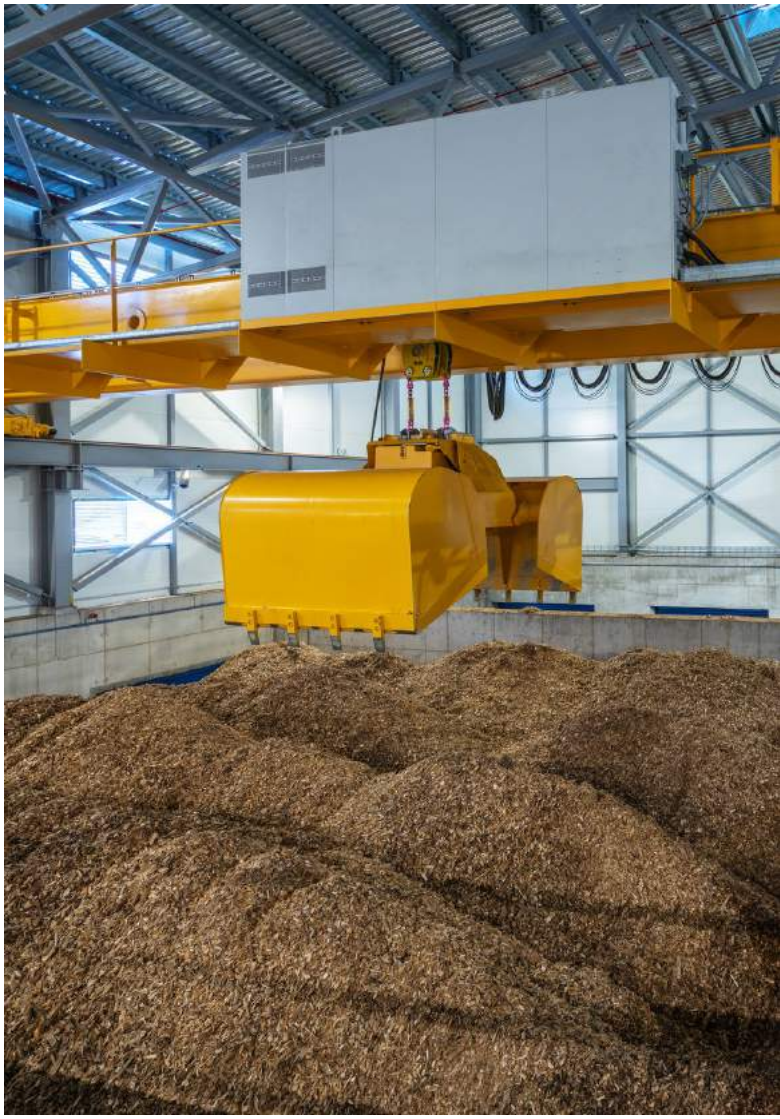
Soulignons enfin que l'impact du changement climatique sur les écosystèmes forestier et agricole ajoute de l'incertitude aux estimations du potentiel de biomasse mobilisable à l'horizon 2050. L'impact réel des sécheresses et des maladies de ces dernières années sur les forêts est encore difficile à évaluer. Les stratégies d'adaptation mises en œuvre pour la préservation de ces écosystèmes seront déterminantes sur l'évolution de la biomasse réellement mobilisable.

Du point de vue des usages, certains scénarios planifient l'atteinte d'une maturité technico-économique suffisante pour des filières encore peu matures (biocarburants avancés, pyrogazéification pour injection de méthane) à l'heure actuelle. L'atteinte de cet objectif à moyen ou long terme pourra également conditionner leur niveau de déploiement à l'horizon 2050.

LES PRODUITS BIOSOURCÉS : UN POTENTIEL ENCORE À APPRÉHENDER

Au vu des incertitudes sur les différentes filières biosourcées, il n'y a pas eu d'hypothèses prises dans les différents scénarios sur un développement majeur de ces produits en substitution aux produits fossiles. Les principales hypothèses ont été prises sur le bioéthanol et le bionaphtalène pour la modélisation parmi toutes les molécules plateformes possibles de la chimie biosourcée (acide succinique, acide lactique, etc.). Ainsi, la totalité du potentiel des produits biosourcés n'a pas été modélisée ni le développement des bioraffineries fonctionnant sur le principe de l'utilisation en cascade de la biomasse. Ces nouvelles unités permettraient d'exploiter au maximum le potentiel de celle-ci *via* la production de molécules pour la chimie et des molécules énergétiques à partir d'une même biomasse et d'améliorer les impacts environnementaux de la filière.

Comme pour les usages énergétiques, l'approvisionnement en biomasse est un élément clé pour les produits biosourcés. Il n'a pas été considéré, dans ce travail, de biomasse propre pour les produits biosourcés (hors usage dans le bâtiment) mais seulement en coproduits lors de la production des biocarburants. Il serait nécessaire d'identifier les gisements de biomasses disponibles pour pouvoir mieux anticiper les besoins futurs de l'industrie. Ainsi, fin 2021, une étude[10] visant à **cartographier les flux de biomasse** dans les principales filières de production de biomolécules a débuté. L'objectif est d'obtenir une description quantitative et qualitative des flux de biomasse (matières premières agricoles et leurs coproduits) issus des grandes cultures du territoire métropolitain. Cette étude devrait pouvoir éclairer sur la faisabilité de nouveaux projets de mobilisation de biomasse et évaluer les concurrences/complémentarités d'usages.



10 FranceAgriMer est à l'initiative de cette étude de cartographie des gisements de biomasses disponibles. Par contre, la sylviculture et la biomasse marine sont hors du périmètre de l'étude.

6. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **RESEDA**, *Gisements et valorisations des coproduits des industries agroalimentaires*, 2017.

[2] **RE2020**, *Éco-construire pour le confort de tous, 2021* (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2021.02.18_DP_RE2020_EcoConstruire_0.pdf).

[3] **DGEC**, *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat*, 2020.

[4] **Agreste**, *Indicateurs de gestion durable 2020,* 2019.

[5] **ADEME, Solagro, Biomasse Normandie, BVA**, *Étude sur le chauffage domestique au bois : marchés et approvisionnement*, 2018.

[6] **FCBA/ADEME**, *Évaluation du gisement de déchets de bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie*, 2015.

[7] **Sylvain Marsac *et al.***, *ELBA : un outil de référence pour l'évaluation de ressource en biomasse agricole en France,* ADEME, 2018.

[8] **ONRB**, Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en *France*, 2020.

[9] **James Gaffey *et al.***, Understanding Consumer Perspectives of Bio-Based Products. *A Comparative Case Study from Ireland and The Netherlands*, Sustainability 2021, 13, 6062. (10.3390/su13116062), 2021.

[10] **ALCIMED pour ADEME/AGRICE**, *Marché actuel des bioproduits énergétiques et industriels et évolutions prévisibles à 2015/2030*, 2006.

[11] **ALCIMED pour ADEME**, *Marchés actuels des produits biosourcés et évolutions à horizons 2020 et 2030*, 2015.

[12] https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants.

[13] **FRD/IAR**, *Panorama des marchés « Fibres végétales techniques en matériaux (hors bois) en France »*, 2020.

[14] **Marie Lesueur, Charline Comparini**, *La filière des algues dans le monde, en Europe, en France. Synthèse de résultats*, Cellule études et transfert, Agrocampus Ouest, 2015, 4 pages, ffhal-01343425.

[15] **Agreste**, *Recensement de la culture d'algues et de cyanobactéries*, 2018.

[16] **Avis ADEME sur la valorisation du CO_2** : https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/1331-filieres-de-valorisation-du-co2-État-de-l-art-et-avis-d-experts-les.html.

[17] Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (Loi AGEC).

[18] Directive (UE) 2019/904 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 relative à la réduction de l'incidence de certains produits en plastique sur l'environnement.

[19] European Commission, *EU Biorefinery outlook to 2030: Studies on support to research and innovation policy in the area of bio-based products and services*, 2021.

[20] **Nova-Institute, BIC**, *European Bioeconomy in Figures 2008-2017*, 2020.

[21] **IGN/FCBA/ADEME**, *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035,* 2016.

[22] **Kerstin Iffland *et al.***, *Definition, Calculation and Comparison of the 'Biomass Utilization Efficiency (BUE)' of Various Bio-based Chemicals, Polymers and Fuels. Nova paper# 8 on bio-based economy*, 2015.

[23] 2005/360/CE de la Commission européenne, du 26 avril 2005, établissant les critères écologiques et les exigences associées en matière d'évaluation et de vérification pour l'attribution du label écologique communautaire aux lubrifiants.

3. Puits de carbone

1. Les écosystèmes mondiaux : des stocks et des puits de carbone essentiels pour le climat
614

2. Description de l'état actuel
619

3. Méthode et outils de quantification des scénarios
628

4. Stratégie pour le secteur selon chaque scénario
632

5. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures
638

6. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour les futurs travaux
640

7. Références bibliographiques
642

8. Annexe : évolution des principales variables du secteur
644

1. Les écosystèmes mondiaux : des stocks et des puits de carbone essentiels pour le climat

QUELQUES DÉFINITIONS PRÉLIMINAIRES [1] [2]

Réservoir de carbone : tout système ayant la capacité d'accumuler ou de libérer du carbone comme par exemple la biomasse forestière, les produits du bois, les sols, l'atmosphère.

Stocks de carbone : quantité absolue de carbone que contient un réservoir de carbone à un moment donné. Les stocks sont généralement exprimés en tonnes de carbone (tC).

Flux de carbone : taux d'échange de carbone entre différents réservoirs (par exemple entre l'atmosphère et la biosphère), exprimé en unité de masse par unité de surface et unité de temps. Les flux de carbone liés aux variations de stocks entre les écosystèmes et l'atmosphère sont généralement exprimés en tCO_2/an. Une variation annuelle de stock de 1 tC correspond à un flux de 3,667 tCO_2/an. Les émissions associées aux variations de stocks peuvent intégrer d'autres gaz à effet de serre que le CO_2 (ex. : N_2O lié à l'azote contenu dans la matière organique), on exprime alors les flux en tCO_2 équivalentes (CO_2eq), en tenant compte du pouvoir de réchauffement global (PRG) des différents gaz.

Puits de carbone : un réservoir donné peut être un puits de carbone atmosphérique et ce, durant un certain laps de temps quand il absorbe plus de carbone qu'il n'en libère. Un écosystème est considéré comme un puits lorsque son stock de carbone augmente, c'est-à-dire lorsqu'il séquestre du carbone.

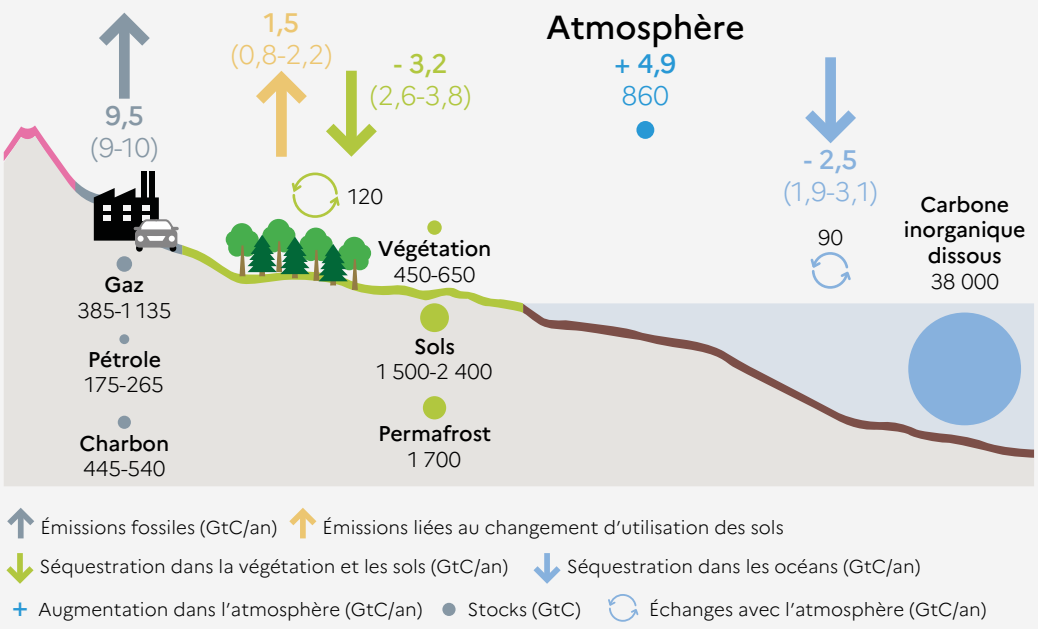
Source : réduction des stocks de carbone dans un réservoir résultant en l'émission de gaz à effet de serre vers l'atmosphère.

Séquestration de carbone : captation et maintien de carbone en dehors de l'atmosphère (*cf.* « puits de carbone »).

Neutralité carbone : la neutralité carbone est atteinte quand les émissions de CO_2 anthropiques sont équilibrées par des puits de carbone anthropiques équivalents, à l'échelle globale et sur une période de temps définie.

La séquestration de carbone est la captation et le maintien de carbone (C) en dehors de l'atmosphère[1]. À l'échelle du globe et sur la période 2009-2018, les écosystèmes, notamment les forêts et les océans, ont séquestré en moyenne 5,7 GtC/an (environ 21 $GtCO_2$/an), soit près de 60 % des émissions de CO_2 liées à la combustion des ressources énergétiques fossiles *(Figure 1)*. Néanmoins, ils ont été également sources de 1,5 GtC/an (environ 5,5 $GtCO_2$/an) à cause des changements d'affectation des sols (ex. : déforestation, mise en cultures de zones humides) et la dégradation des écosystèmes. Malgré leur rôle de puits, ce sont ainsi 4,9 GtC/an (environ 18 $GtCO_2$/an) qui se sont accumulées dans l'atmosphère. En parallèle d'une réduction drastique des émissions, le maintien, voire l'accroissement de cette séquestration, y compris par des moyens technologiques, est l'une des mesures indispensables pour atteindre la neutralité carbone.

Figure 1 *Stocks et flux de carbone dans le monde entre 2009 et 2018 en Gt de carbone par an*



Source : [3].

Plusieurs approches sont possibles :

LA SÉQUESTRATION DANS LES ÉCOSYSTÈMES TERRESTRES

Les écosystèmes terrestres stockent du carbone sous forme de matières organiques (ex. : bois, matières organiques en décomposition dans les sols). Ces matières organiques sont issues de la captation par les végétaux du CO_2 de l'atmosphère *via* la photosynthèse (environ 120 GtC/an au niveau mondial). Cette captation est contrebalancée par un flux inverse du même ordre de grandeur, principalement lié à la respiration des végétaux (respiration autotrophe) et à la décomposition des matières organiques par les micro-organismes et les animaux (respiration hétérotrophe) mais également à la combustion. Le carbone stocké dans les écosystèmes terrestres et son évolution résulte donc de l'équilibre entre les entrées par photosynthèse et les sorties par respiration ou combustion. En général, on ne considère que la résultante, c'est-à-dire le bilan net entre ces flux, qu'il soit une séquestration ou une émission.

À l'échelle mondiale, la biomasse végétale (principalement les arbres) et les sols (y compris les tourbières) représentent des stocks de carbone organique 3 à 4 fois plus importants que celui de l'atmosphère. Les écosystèmes terrestres constituent déjà un puits de carbone en séquestrant annuellement environ 3,2 milliards de tonnes de carbone (*i.e.* 11,7 milliards de tonnes de CO_2). Dans le même temps, le changement d'usage des sols génère un flux annuel d'émission vers l'atmosphère d'environ 1,5 milliard de tonnes de carbone (*i.e.* 5,5 milliards de tonnes de CO_2). Le bilan est une séquestration annuelle de 1,7 milliard de tonnes de carbone (*i.e.* 6,2 milliards de tonnes de CO_2). La préservation des stocks et des puits existants et, dans certains cas, leur restauration sont donc un enjeu prioritaire.

1 EFESE, 2018.

Par ailleurs, une part importante de ces milieux est exploitée pour l'agriculture et la sylviculture. Des modes de gestion permettant d'accroître les stocks (et donc de séquestrer du carbone) sont déjà bien connus : couverture végétale des sols agricoles, afforestation et agroforesteries (y compris haies), par exemple. Ils présentent des potentiels importants *(Graphique 1)* et sont généralement accompagnés de nombreux cobénéfices pour l'environnement (amélioration de la fertilité des sols, biodiversité, adaptation au changement climatique…), à condition que la disponibilité en eau soit suffisante pour permettre la croissance des végétaux et que les impacts sur la biodiversité soient bien pris en compte. Leurs principales limites sont de devoir être mis en œuvre sur de grandes surfaces, que l'accroissement des stocks est limité dans le temps (de l'échelle de la décennie à celle du siècle) et que les modes de gestion doivent être maintenus, y compris après la stabilisation des stocks, pour ne pas réémettre le carbone séquestré. Par ailleurs, stocks et puits de carbone sont directement liés au niveau de prélèvement de la biomasse. Un accroissement des prélèvements, notamment dans le cadre d'un développement de la bioéconomie, pourra avoir un effet dépressif sur les stocks ou les puits actuels.

Enfin, comme les écosystèmes sont sensibles aux évolutions climatiques, l'atteinte des objectifs climatiques est essentielle pour pérenniser le stockage et limiter les risques de rétroactions sur le climat en cas de « relargage » des stocks existants. Les stratégies favorisant la résilience des écosystèmes et permettant de maintenir les stocks constituent ainsi également une stratégie de lutte contre le changement climatique.

LA SÉQUESTRATION DANS LES ÉCOSYSTÈMES MARINS

Les écosystèmes marins, baptisés carbone bleu, désignent à la fois des écosystèmes marins côtiers particuliers (mangroves, herbiers, marais côtiers, etc.) et les écosystèmes marins du large [4]. Dans ces écosystèmes, le carbone est présent sous diverses formes : très majoritairement sous forme de carbone inorganique dissous (38 000 GtC) mais également, pour quelques milliards de tonnes de carbone, sous forme de carbone organique (biomasse vivante, particules ou composés dissous).

Les océans représentent, avec les écosystèmes terrestres, un des principaux puits de carbone au niveau mondial avec une valeur de 2,5 GtC/an (soit 9,2 $GtCO_2$/an). Ce puits de carbone s'explique principalement par la solubilisation du CO_2 dans les eaux de surface induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique. Une très faible fraction est captée par le phytoplancton, transférée en profondeur par sédimentation et isolée de l'atmosphère pour une longue échelle de temps. Néanmoins, ce processus joue un rôle important dans le maintien des stocks de carbone océanique. On estime ainsi que sans cette pompe dite « biologique », l'accroissement des concentrations de CO_2 dans les eaux de surface se traduirait par une augmentation du CO_2 atmosphérique massive, de l'ordre de 100 à 200 ppm. Les écosystèmes côtiers, quant à eux, présentent des conditions de salinité, productivité, etc. qui favorisent localement la séquestration de carbone (ex. : mangroves, herbiers), avec des valeurs de stocks à l'hectare importante comparables ou supérieures à celles des forêts.

En France, les écosystèmes marins sont principalement localisés en outre-mer, la France possédant le deuxième domaine maritime mondial. En l'état des connaissances actuelles, les écosystèmes côtiers séquestreraient l'équivalent de moins de 1 % des émissions annuelles françaises actuelles [4]. Dans le cadre de cet exercice prospectif, aucun levier d'accroissement de la séquestration dans les milieux marins et littoraux n'a pu être pris en compte en l'absence de références nationales. Ces éléments mettent néanmoins en avant l'enjeu de la préservation et de la restauration des écosystèmes marins et de leur biodiversité.

LA SÉQUESTRATION PAR DES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE ET DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE

La séquestration du CO_2 peut être réalisée par des technologies de captage et de stockage (CCS[2]) dans des formations géologiques comme des aquifères salins, des réservoirs épuisés de gaz ou par carbonatation des roches ultrabasiques telles que les basaltes. Cela requiert cependant la mise en place de technologies de captage sur les sources de CO_2, de transport et d'injection dans le sous-sol pour séparer physiquement le CO_2 de l'atmosphère. Ces technologies peuvent viser à capter les émissions liées à la combustion d'énergies fossiles (CCS), celles issues de biomasse pour la production d'énergie (*bioenergy with carbon capture and storage* [BECCS]) ou directement le CO_2 présent dans l'atmosphère (*direct air carbon capture and storage* [DACCS]). Le CCS est aujourd'hui techniquement opérationnel avec des réalisations à l'échelle industrielle à travers le monde. Néanmoins, les technologies CCS nécessitent pour être efficaces d'être associées à des installations industrielles de grandes tailles telles que cimenteries ou centrales thermiques. Pour le BECCS, des adaptations sont nécessaires pour la partie captage mais cette technologie est aussi considérée comme mature. Comme pour le CCS, des

2 *Carbon capture and storage* en anglais.

optimisations sur la consommation énergétique sont indispensables pour améliorer les performances du BECCS. Pour le DACCS, la maturité est plus faible car son développement est plus récent. Quelques pilotes sont en cours de démonstration notamment aux États-Unis et en Islande.

Le déploiement à grande échelle du BECCS peut causer des risques environnementaux et de concurrence importants avec la production alimentaire [5] car cette technologie requiert des centrales de production d'électricité de taille importante (>100 MW) et donc une consommation importante de biomasse dont les usages sont déjà nombreux (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*). Par ailleurs, le bilan GES de son développement doit tenir compte de son impact sur la séquestration de carbone dans les écosystèmes. À noter qu'en France, la mise en place de BECCS est difficilement conciliable avec celle de chaufferies bois de petite taille telles que celles actuellement déployées sur le territoire. Quant à la technologie DACCS, elle est limitée en raison de sa consommation énergétique très élevée, laquelle implique l'utilisation d'une grande quantité d'énergie renouvelable pour éviter l'émission de CO_2 liée à la combustion d'énergie fossile. Dans tous les cas, l'injection du CO_2 nécessite un contexte géologique adapté, même si le CO_2 capté peut être transporté.

LA SÉQUESTRATION DANS LES MATÉRIAUX

Celle-ci peut se faire dans les matériaux biosourcés comme le bois ou d'autres matériaux conçus pour stocker du CO_2 par minéralisation.

Pour les matériaux biosourcés, le stockage sera d'autant plus important que la durée de vie des matériaux sera longue. Augmenter la durée de vie des produits biosourcés favorise donc la séquestration de carbone. Néanmoins, dans le cas d'une production accrue des matériaux biosourcés, il faut veiller à ce que les émissions ou réductions de séquestration de carbone liées à l'augmentation des prélèvements de biomasse soient limitées et que la production des biomasses nécessaires n'entre pas en concurrence avec d'autres ressources pour l'usage des sols. À volume de production de biomasse constant, des mesures concernant l'optimisation de l'utilisation des biomasses sont à mettre en place : prioriser les usages à longue durée de vie, améliorer les rendements matières, augmenter la durée de vie, favoriser le recyclage (*cf.* chapitre *2.4.2. Ressources et usages non alimentaires de la biomasse*).

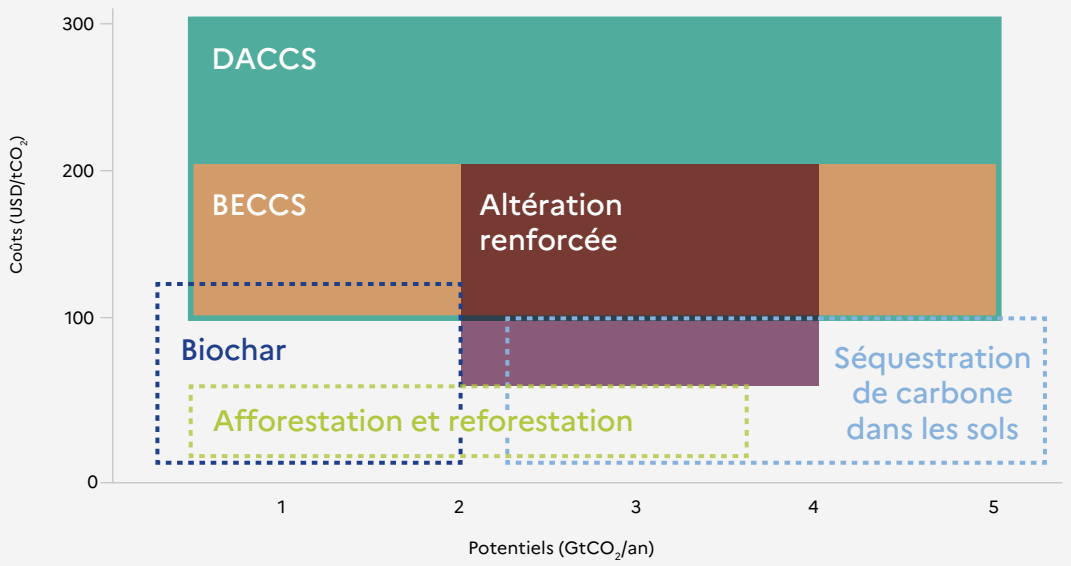
Un autre moyen de stocker le CO_2 dans les matériaux est la minéralisation (réaction du CO_2 avec des minéraux). Il est possible de produire des matériaux minéraux comme du calcaire ou d'autres composés *via* la réaction du CO_2 avec les roches adéquates (basiques ou ultrabasiques comme l'olivine) ou à partir de déchets. Dans le cas de l'utilisation de déchets du BTP, il est possible de recycler des matériaux de déconstruction *via* la carbonatation minérale. De nouvelles formules de bétons peuvent être conçues à partir d'agrégats et de CO_2, conduisant ainsi à une séquestration du CO_2. Les bénéfices liés à ces nouveaux matériaux sont encore à évaluer. Le CO_2 capté y est néanmoins stocké de manière permanente. Actuellement, ces procédés sont en cours de développement avec un niveau de maturité encore faible.

LA SÉQUESTRATION PAR L'APPORT D'AMENDEMENTS DANS LES SOLS (BIOCHARS OU SILICATES)

Les biochars correspondent à la partie solide résultant de la pyrolyse partielle de biomasses, qui pourrait résulter du déploiement de technologie comme la pyrogazéification. Ils sont riches en carbone et présentent une stabilité fortement accrue par rapport aux matières organiques non pyrolysées. Des potentiels de stockage de plusieurs centaines de millions de tonnes de carbone par an sont mis en avant à l'échelle du globe si l'on réoriente de nombreuses biomasses vers cette voie [6]. Ils sont également promus pour leurs bénéfices sur la fertilité des sols, en particulier en sols tropicaux, et la réduction des émissions de N_2O. Néanmoins, la question se pose du meilleur usage de la biomasse entre stockage de carbone dans les biochars, production d'énergie par exemple *via* pyrogazéification complète et retour au sol des matières organiques directement ou après compostage ou méthanisation. Bien que cette technologie soit prometteuse et plutôt simple à mettre en œuvre (TRL 7-9 pour la production), les bénéfices pour la séquestration de carbone et la fertilité des sols sont à préciser selon les types de biochars, les types de sols et les systèmes de cultures ciblés, tout comme les gisements potentiels pour chaque biomasse envisagée. L'apport de silicates (issus de déchets ou de roches naturelles comme les basaltes) finement broyés est également envisagé pour stocker du carbone (lors de l'altération des silicates) et gérer le pH des sols. Les bénéfices et impacts des apports de silicates sont encore peu caractérisés à ce jour.

L'ensemble des leviers peut théoriquement être activé en parallèle, comme l'illustrent les différents scénarios proposés par le GIEC dans son rapport sur l'objectif 1,5 °C *(Graphique 1)*. Néanmoins, certains antagonismes doivent être considérés entre ces approches. Notamment, entre l'usage accru des biomasses (produits bois, BECCS, biochar) et la séquestration dans les écosystèmes (niveau de stockage par ha, surfaces disponibles). L'augmentation de la production et de la récolte de la biomasse pourrait aussi générer des impacts négatifs sur la biodiversité et la qualité des sols.

Graphique 1 *Coûts et potentiels minimum et maximum estimés des leviers de séquestration du carbone*



N.B. : ce graphique, issu des travaux du GIEC, présente les potentiels à l'horizon 2050 à l'échelle globale et les coûts à la tonne de CO_2 pour les approches DACCS, BECCS, altération des minéraux, biochars, afforestation et reboisement des forêts dégradées et séquestration de carbone dans les sols agricoles. Les potentiels sont importants pour toutes ces approches mais les coûts sont généralement plus faibles pour les approches basées sur la séquestration dans les écosystèmes et sur les biochars (< 100 USD la tonne de CO_2).

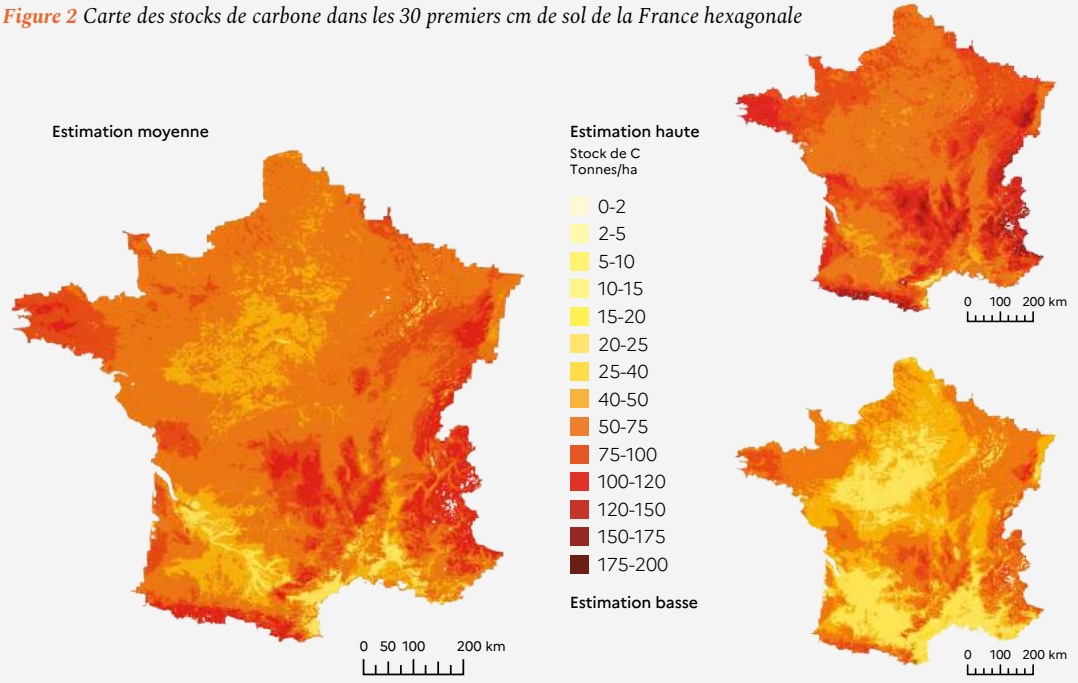
Source : traduit de [6].

2. Description de l'état actuel

2.1. La séquestration dans les écosystèmes terrestres : déjà en cours et des potentiels d'accroissement

En France métropolitaine, on estime que les écosystèmes terrestres stockent 4 à 5 milliards de tonnes de carbone (~ 14,5 à 18,5 $GtCO_2$) dans la biomasse et les 30 premiers centimètres de sol, auxquelles on peut ajouter environ 2 milliards de tonnes de carbone (~ 7,5 $GtCO_2$) en Guyane (*Figure 2* et *Figure 3*).

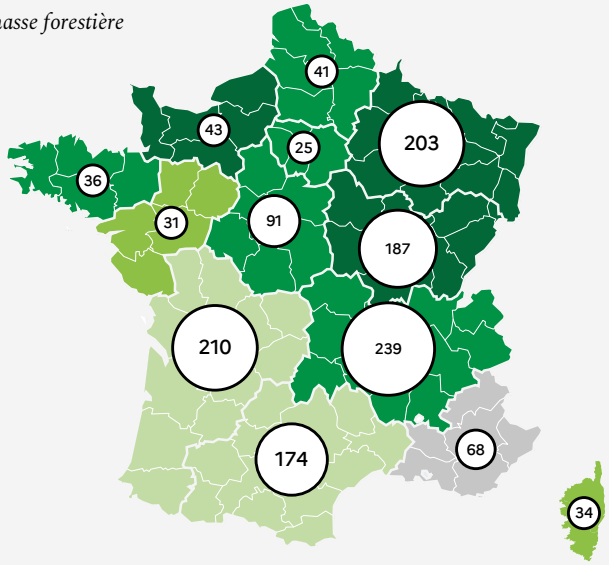
Figure 2 *Carte des stocks de carbone dans les 30 premiers cm de sol de la France hexagonale*



N.B. : les stocks les plus importants se retrouvent dans les régions de montagne, forestières et d'élevage. Les stocks les plus faibles dans les régions de grandes cultures, de vignes et méditerranéennes.

Source : [7].

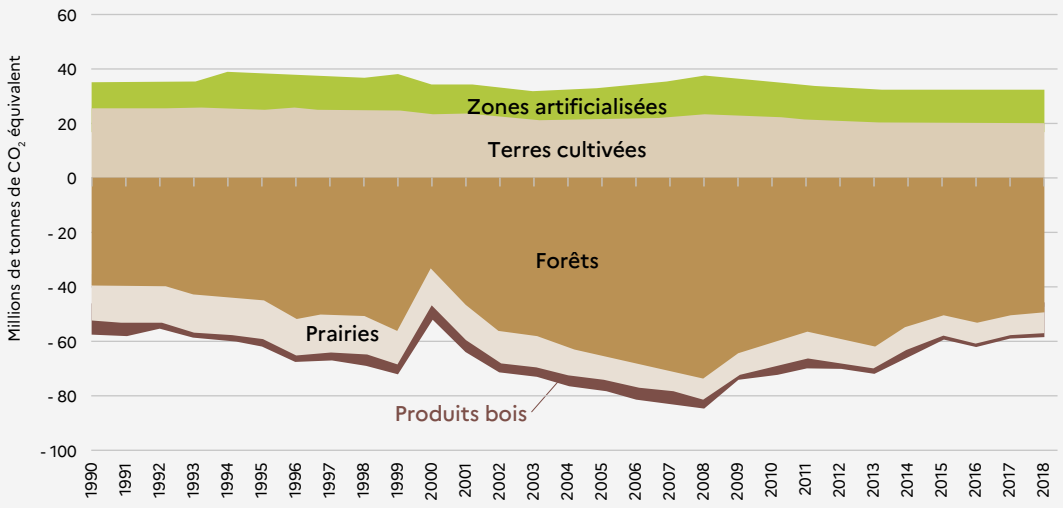
Figure 3 *Carte des stocks de carbone dans la biomasse forestière*



Source : [8].

Les écosystèmes terrestres français constituent déjà un puits de carbone très significatif que l'EFESE estime en Métropole à près de 20 % des émissions françaises de 2015, soit environ 90 millions de tonnes CO_2eq/an [4]. Seule une partie est considérée comme anthropique et comptabilisée dans les inventaires d'émissions de la France produits par le CITEPA (~ 60 millions de tonnes CO_2eq en 2015[3] *(Graphique 2)*. Ils sont également sources d'émissions par déstockage de carbone liées à des changements d'usages des terres *(Figure 4)*. Il s'agit majoritairement de l'urbanisation, notamment *via* l'imperméabilisation des sols et le déboisement, et de la réduction des surfaces en prairies permanentes au profit des cultures. Les flux de CO_2 et leur évolution depuis 1990, tels que calculés dans l'inventaire national, sont présentés en *Graphique 2*.

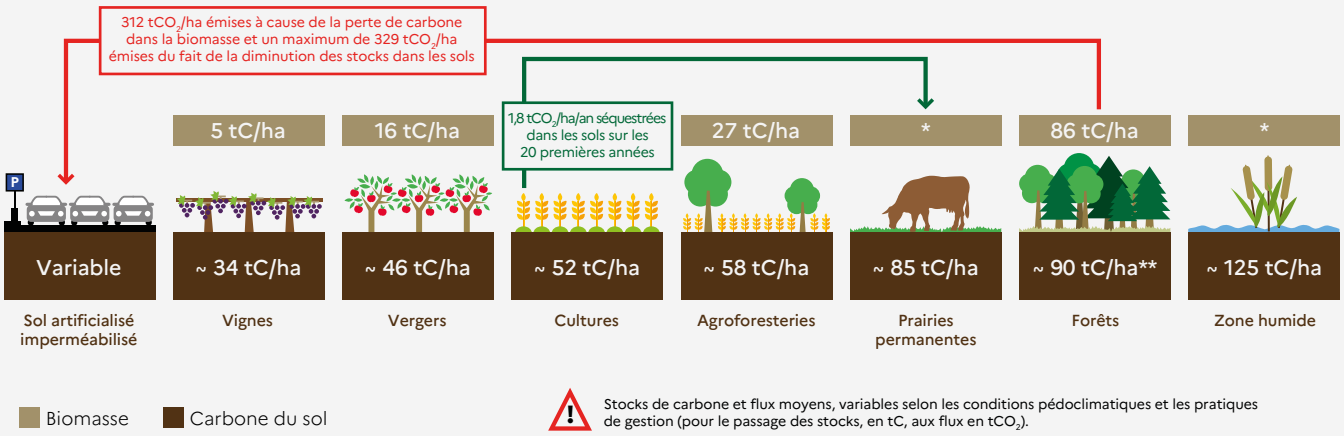
Graphique 2 Répartition des flux annuels de CO_2eq du secteur de l'UTCATF en France (Métropole et Outre-mer)



Note de lecture : les forêts constituent un puits d'environ 49,5 $MtCO_2$eq en 2018, alors que les terres cultivées et l'artificialisation ont contribué à émettre environ 30 $MtCO_2$eq en 2018. Le bilan net « séquestration – émission » est de - 30,7 $MtCO_2$eq. Il est important de noter que nous estimons dans la présente étude un puits actuel supérieur à celui de l'inventaire car nous intégrons des estimations de puits de carbone dans les sols forestiers et les bois morts [9] [10] qui ne sont pas prises en compte dans l'inventaire.

Source : [11].

Figure 4 Effet du changement d'affectation des terres sur les stocks de carbone organique dans les sols et la biomasse



* Variable selon si herbacé, arbustif ou arboré.
** Intégrant le carbone du sol et la litière.

Source : [8].

3 https://www.citepa.org/wp-content/uploads/2.7-UTCATF_2020.pdf.

2.1.1. Les milieux forestiers : préserver, gérer durablement et favoriser la résilience

Les forêts de Métropole, en croissance à la fois en superficie et en volume, sont un puits de carbone depuis plusieurs décennies. Les estimations sont néanmoins variables, notamment selon le périmètre considéré. D'après [4], elles séquestreraient près de 87 millions de tonnes de CO_2 en 2015 en incluant le sol, les bois morts et la biomasse vivante. Pour cette étude, nous avons utilisé les valeurs du puits de l'inventaire CITEPA pour la biomasse vivante (49,5 $MtCO_2$ en 2018), auquel nous avons additionné un puits dans les sols et dans le bois mort issu de la littérature scientifique. Nous recalculons ainsi un puits de carbone de 61,2 $MtCO_2$ en 2018 pour le même périmètre que [4].

En Outre-mer, le principal massif forestier est la Guyane. La forêt guyanaise représente des stocks de carbone très importants, estimés entre 2 et 2,6 milliards de tonnes de carbone [12]. Leur préservation constitue donc un enjeu important alors même que la déforestation est la principale source d'émissions de GES du territoire [13]. Il est considéré que ces forêts sont arrivées à leur capacité maximale de stockage de carbone et donc leur puits semble s'être interrompu.

D'après [9], le puits forestier tend à diminuer sur les années récentes (depuis 2008) en lien avec une hausse de la récolte de bois. En effet, la plupart des travaux sur le sujet montrent que l'augmentation des prélèvements de bois a un effet dépressif sur le puits forestier (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*). Cette tendance doit encore être confirmée avec la poursuite de l'inventaire forestier national mis en œuvre par l'IGN. Il apparaît également que les événements climatiques extrêmes récents tels que les tempêtes et les dépérissements observés dans certaines zones forestières ont eu un impact significatif sur le puits forestier à l'échelle de la France. Ces signaux posent la question de leur impact sur la séquestration à plus long terme, dans la mesure où des épisodes extrêmes plus fréquents et plus intenses sont prévus. Ils interrogent aussi sur les modes de gestion à mettre en place pour adapter les forêts et favoriser leur résilience face aux impacts du changement climatique.

Il est à noter que nos modes de consommation, notamment nos régimes alimentaires, ont un impact significatif sur les écosystèmes forestiers hors de nos frontières. C'est le cas en particulier à l'international en zone tropicale, du fait de phénomènes de déforestation et du changement d'affection des sols pour la production de denrées à destination de l'alimentation humaine (fruits exotiques, thé, café, cacao, huiles…) et animale (tourteau de soja…). Ce phénomène existe aussi dans le cas de la production de biocarburants (huile de palme…). Les surfaces de sols affectées par les importations agricoles françaises représentent environ 12 millions d'hectares en 2013 [14], soit plus que la surface de la forêt guyanaise (8 millions d'hectares). La déforestation, couplée à la dégradation des zones boisées de bordure, a une conséquence directe sur la capacité des forêts tropicales à stocker du carbone. Une étude publiée en avril 2021 [15] indique par exemple que la partie brésilienne de la forêt amazonienne émet aujourd'hui davantage de carbone qu'elle n'en séquestre. De fait, l'évolution des régimes pourra avoir un impact sur cette empreinte sol et sur la capacité de ces terres à stocker ou déstocker du carbone.

2.1.2. Les milieux agricoles : développer la séquestration de carbone dans le cadre de la transition agroécologique

En France, les terres cultivées émettraient de l'ordre de quelques millions de tonnes de CO_2eq par an par déstockage de carbone ou seraient proches de la stabilité de leurs stocks selon les estimations [10]. Les pertes de stocks seraient principalement situées dans les régions où l'élevage est en déclin, en lien avec le recul des surfaces en prairies. Les plaines historiquement céréalières auraient des stocks stables, voire légèrement en hausse avec l'augmentation des rendements et l'évolution de certaines pratiques : maintien des résidus de culture au sol, développement des cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) en zones vulnérables de la directive Nitrates. Les prairies permanentes représenteraient un léger puits, estimé entre 1 et 7 millions de tonnes de CO_2eq par an, selon les sources de données.

On estime aujourd'hui que le potentiel de séquestration additionnelle est d'environ 50 $MtCO_2$/an à l'horizon 2050, sans revenir sur la spécialisation des bassins de production. Les pratiques à plus fort potentiel sont l'agroforesterie intraparcellaire, les couverts végétaux en interculture et l'allongement des prairies temporaires. Cette séquestration de carbone s'accompagnerait de cobénéfices sur la qualité des sols (augmentation des teneurs en matières organiques, couverture des sols en hiver) et sur la biodiversité (ex. : renforcement de la présence d'arbres en bord et au sein des parcelles agricoles).
Un redéploiement de la polyculture-élevage à l'échelle nationale pourrait éventuellement permettre d'aller plus loin *via* l'extension des prairies et du bocage, sans que cela ait été chiffré. Cependant, ce redéploiement doit rester cohérent avec la disponibilité en eau et la réduction du cheptel bovin, en lien avec la réduction de la consommation de viande, un des enjeux majeurs pour la réduction des émissions de gaz du système alimentaire.

2.1.3. Les milieux humides : préserver des écosystèmes à haut niveau de stocks de carbone et de services

Outre leur importance pour la biodiversité et le cycle de l'eau, ces milieux accumulent localement des quantités très importantes de carbone. À titre d'exemple, [4] propose un stock moyen de 876 tC/ha pour une tourbière de Métropole, soit environ 10 fois plus important que celui observé en moyenne dans les 30 premiers cm de sol d'une prairie permanente de Métropole. Certains milieux humides et aquatiques continentaux peuvent également constituer un puits de carbone élevé. Néanmoins, du fait de la faiblesse des surfaces couvertes, ils séquestrent actuellement moins de 4 $MtCO_2$/an. Ils sont en recul depuis de nombreuses années [16]. L'enjeu est donc de les préserver et de les restaurer.

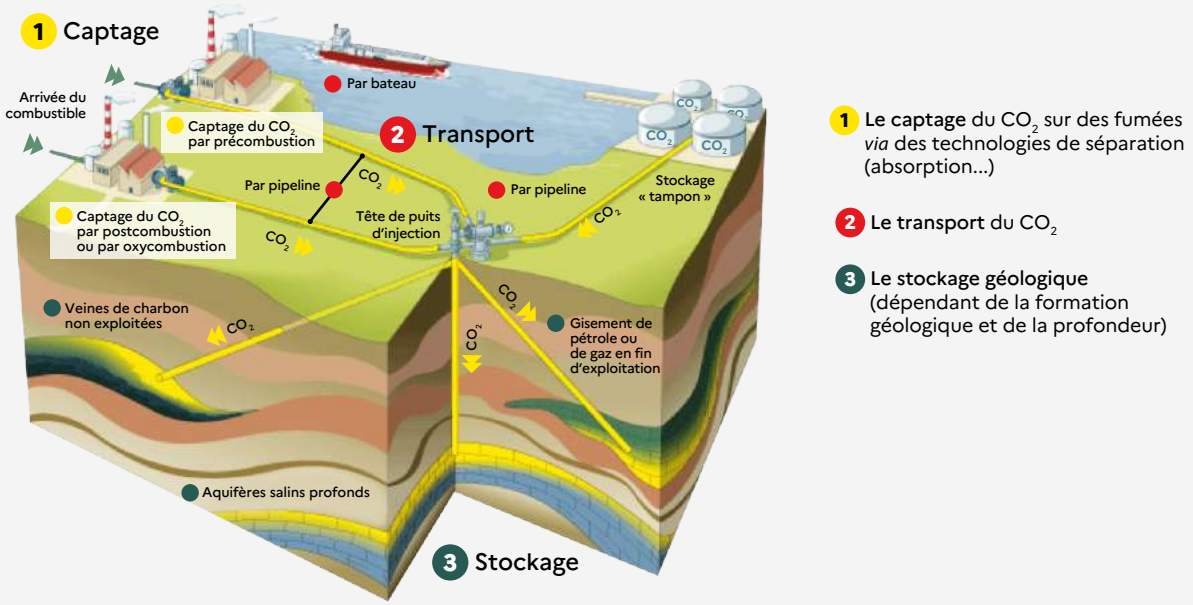
2.1.4. Les milieux urbains : limiter l'imperméabilisation et végétaliser pour la séquestration et l'adaptation

Les milieux urbains abritent des espaces verts (parcs, jardins et espaces en herbe aux abords des bâtiments), qui constituent un réservoir de carbone. Celui-ci est encore mal connu. Les premières évaluations sont récentes et mettent en évidence des stocks de carbone pouvant être comparables à ceux des milieux ruraux [17]. À l'échelle nationale, ces stocks restent néanmoins quantitativement faibles par rapport à ceux présents dans les milieux naturels et agricoles au regard des surfaces concernées. Depuis plusieurs décennies, les espaces verts comme les espaces agricoles et naturels périurbains sont menacés par le développement de l'imperméabilisation des sols pour l'habitation, la voirie, les industries, les entrepôts de stockage (ces éléments seront abordés dans un feuilleton spécifique sur l'usage des terres et la qualité des sols). L'imperméabilisation des sols est la menace la plus dommageable, car elle s'accompagne généralement d'une perte des stocks de carbone présents dans les premiers horizons de sol et empêche le développement d'un puits de carbone. Par exemple, [18] ont mesuré sur la ville de Nantes des stocks de carbone 5 fois plus faibles en sols scellés qu'en sols d'espace verts, auxquels il faudrait ajouter les stocks de carbone des arbres en ville. La réduction de l'imperméabilisation des sols, le développement et l'amélioration des pratiques de gestion des espaces verts et la végétalisation des bâtiments sont également des enjeux pour l'adaptation des villes au changement climatique (rafraîchissement). Ils peuvent se transformer en puits de carbone le cas échéant.

2.2. La séquestration par captage et stockage (BECCS et DACCS), des technologies énergivores

Le Captage et Stockage géologique du CO_2 (CCS) a été développé comme solution de réduction d'émissions de CO_2 des sources fortement émettrices, telles que les centrales électriques à base fossile ou les industries lourdes. Le CCS consiste en l'assemblage de plusieurs briques technologiques qui forment une chaîne *(Figure 5)* destinée à séparer le CO_2 des fumées et le stocker dans le sous-sol (à plus de 1 000 m de profondeur) [19].

Figure 5 *Chaîne CCS : captage, transport et stockage géologique du CO_2*



Actuellement, dans le monde, plus d'une vingtaine de projets CCS à large échelle (minimum 800 $ktCO_2$/an stockées) sont en cours d'opération avec une prédominance des États-Unis. Cela représente environ 250 $MtCO_2$ stockés dans le monde depuis le début de la mise en œuvre du CCS au milieu des années 1990. Des unités industrielles ont été installées essentiellement sur des sites d'exploitation gazière (extraction et réinjection du CO_2 contenu dans les gisements de gaz) et des centrales électriques (charbon ou gaz). Une première mondiale a été mise en opération en 2016 sur un site sidérurgique par Emirates Steel. Le CCS peut conduire en général à une réduction des émissions de CO_2 de l'émetteur entre 60 % à 80 %. Le volume de CO_2 stocké ne correspond pas au volume de réduction de CO_2, car le CCS est une technologie énergivore qui implique de considérer les émissions liées à la technologie elle-même. La technologie CCS est traitée plus en détails dans le chapitre *2.2.3. Production industrielle*, avec notamment l'inclusion du CCS dans certains scénarios pour la réduction des émissions de certains secteurs industriels.

Le CCS peut permettre également de réduire les émissions de CO_2 liées à l'utilisation de la biomasse dans un procédé (combustible ou matière première), que ce soit pour de la production d'électricité, de chaleur, de biocarburants ou d'hydrogène. Pour rappel, la biomasse capte le CO_2 pour sa croissance et sa combustion conduit à la réémission de ce CO_2 dans l'atmosphère. En ajoutant du CCS à l'unité fonctionnant avec de la biomasse, ce CO_2 biogénique est séparé physiquement de l'atmosphère en étant stocké dans le sous-sol. Cette technologie est considérée comme un puits technologique car elle réduit les émissions biogéniques. Les unités à même de mettre en place le CCS et utiliser de la biomasse sont donc les principales cibles pour la mise en place de BECCS :

- **l'industrie, comme la sidérurgie et les cimenteries** si de la biomasse est utilisée en substitution à du combustible fossile car premières cibles du CCS ;
- **les unités de bioraffineries (ex. : production de bioéthanol)** ;
- **les unités de production d'électricité et/ou de chaleur.**

Néanmoins, il est nécessaire de considérer les bénéfices potentiels du BECCS avec précaution. Le BECCS permet de réduire les émissions biogéniques mais il ne s'agit pas forcément d'émissions négatives car il faut considérer le cycle du carbone dans son ensemble (impact sur le puits forestier par exemple) pour évaluer le gain réel en termes de GES.

Les différents scénarios proposés par le GIEC dans son rapport sur l'objectif 1,5 °C font appel aux puits technologiques de manière différenciée en fonction du cadrage du scénario. Ainsi le scénario avec la part la plus importante de puits technologiques a recours essentiellement au BECCS. En effet, la mise en place de CCS sur des centrales de production d'électricité à partir de biomasse est la voie privilégiée. Actuellement, il n'existe que cinq unités de BECCS dans le monde, dont quatre unités de production de bioéthanol avec captage de CO_2. Le site de Decatur dans l'Illinois aux États-Unis, qui produit du bioéthanol à partir de la fermentation de maïs, capte et stocke le CO_2 dans un réservoir géologique [20]. Les trois autres sites utilisent le CO_2 pour faire de la récupération assistée d'hydrocarbures [21].

Au niveau français, il n'y a aucune unité BECCS en fonctionnement. Au niveau international, il existe des velléités de convertir des centrales charbon en centrales biomasse, ce que fait actuellement la compagnie DRAX au Royaume-Uni. La partie CCS est prévue dans un second temps. En France, la conversion des centrales charbon à la biomasse reste très controversée, tout comme le stockage géologique de CO_2. Sans prendre en compte l'opposition sociétale face au stockage géologique de CO_2, les deux unités identifiées actuellement en France, Gardanne et Cordemais, n'ont pas de site de stockage géologique à proximité pour réaliser du CCS.

L'INDUSTRIE

Pour accompagner la décarbonation de l'industrie, une des stratégies est de convertir des chaudières fioul à la biomasse. En général cela concerne de petites unités de 20 à 75 MW, ce qui représente de faibles volumes de CO_2 et rendrait donc la mise en place de BECCS complexe, notamment en raison du coût des infrastructures à déployer. Il pourrait être envisagé de développer du BECCS en France en optimisant la synergie entre les sites industriels qui pourraient remplacer des ressources fossiles par une partie en biomasse et la mise en place d'unités de captage pour de gros volumes (plus de 100 $ktCO_2$/an). Les principaux secteurs concernés sont ceux avec des « émissions difficilement évitables » : l'acier, le ciment, les produits chimiques et le verre. À noter que les unités industrielles utilisant déjà de la biomasse comme les papeteries pourraient aussi mettre en œuvre du CCS sans augmenter la pression sur la biomasse (il reste toutefois la question de l'approvisionnement en énergie du système de captage).

Le secteur de la **sidérurgie** dispose de peu de retours d'expériences sur le BECCS mais des expérimentations ont été réalisées séparément sur la biomasse-énergie et le CCS. Le remplacement partiel du charbon par de la biomasse (charbon de bois) dans un haut fourneau a été mis en place au Brésil avec l'évaluation de l'impact sur la déforestation [22]. Des unités de captage à hauteur de 1 $MtCO_2$/an ont été mises en place sur des unités sidérurgiques aux

Émirats arabes unis et en Chine. Les coûts estimés pour la mise en place de BECCS sur des hauts fourneaux européens sont autour de 122-244 EUR/tCO_2[4] et sont dépendants des sites [23]. La combinaison de l'utilisation de la biomasse avec le CCS nécessite de réaliser des évaluations environnementales sur l'ensemble de la chaîne pour déterminer si le BECCS est un moyen de réduction d'émissions de CO_2 ou un puits technologique, car le besoin additionnel de biomasse n'est pas neutre sur le puits carbone naturel [24] [25].

Dans le cas des **cimenteries**, le *calcium looping*[5] semble la plus prometteuse des technologies de captage étudiées [26] [27] [28]. Le charbon est souvent l'énergie utilisée pour couvrir la demande en chaleur du système de calcium looping, car c'est le combustible le plus utilisé dans l'industrie cimentière. Il serait possible d'utiliser de la biomasse pour maximiser la réduction des émissions de CO_2.

LES UNITÉS DE TRAITEMENT DE DÉCHETS

Il est également possible de mettre en place du CCS sur des unités de traitement de déchets, secteur hors industrie. Récemment, la Commission européenne a décidé d'inclure les émissions des usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) dans le système d'échange de quotas d'émissions de l'UE (SEQE-UE) [29]. Cette annonce a fait accélérer les projets R&D sur le CCS. Malgré de nombreuses années de recherche sur le sujet dans ce secteur, aucune réalisation à l'échelle industrielle n'a été mise en place. La mise en place de CCS sur des UIOM pourrait permettre de réduire des émissions difficilement évitables et de séquestrer du CO_2 biogénique. En effet, 60 % des émissions du secteur sont considérées d'origine biogénique. Toutefois, l'impact est à relativiser : les UIOM étant généralement considérées comme de petits émetteurs sous le seuil des 100 ktCO_2/an, seule une partie d'entre elles pourrait être éligible au CCS.

LES UNITÉS UTILISANT DE LA BIOMASSE

Concernant les unités de **biomasse-énergie**, la possibilité d'implanter du CCS sur des chaudières produisant de la vapeur à partir de biomasse dépend de leur taille et de leur localisation. En effet, la mise en place de CCS implique qu'elles soient à proximité d'un site de stockage géologique de CO_2 ou d'un hub CO_2 permettant de le transporter. De plus, la taille de la chaudière a un impact sur le design du système de captage : plus la puissance sera élevée plus les coûts (CAPEX et OPEX) seront faibles. Or, seulement la moitié des chaudières, soit une quinzaine environ, ont une puissance supérieure à 50 MW. En fonction de leur localisation, ces chaudières pourraient être éligibles au CCS et donc conduire à du BECCS. Les chaudières concernées sont celles de l'industrie ou pour du chauffage collectif urbain.

Les **bioraffineries** utilisant de la biomasse pour de la production de biocarburant conduisent à de la réémission de CO_2 biogénique au cours du procédé (une partie seulement, l'autre partie étant réémise lors de la combustion du biocarburant dans les moteurs). Les bioraffineries sont donc des candidates potentielles pour la mise en place de CCS si des sites géologiques sont proches ou d'un hub CO_2 permettant de le transporter. Les concentrations en CO_2 des unités de bioraffineries sont variables en fonction des procédés et vont donc entraîner un coût différent de captage. Par exemple, la fermentation éthanoïque produit un flux gazeux d'une très grande pureté (99 %) ce qui conduit à un coût relativement bas du captage de CO_2 (environ 22 EUR/tCO_2 évités, *cf.* note de bas de page 4) [30] [31].

Actuellement, en France, il n'existe aucun projet de puits de carbone technologique (BECCS) sur des unités de bioraffineries. Mais il existe des projets de récupération de CO_2 sur des unités de production de bioéthanol. Le CO_2 capté est ensuite vendu sur le marché du CO_2 pour une utilisation directe (industrie agroalimentaire, serres...). Il ne s'agit pas d'un puits de carbone technologique en soi, mais potentiellement l'usage de ce CO_2 biogénique peut conduire à des réductions d'émissions de CO_2 pour le secteur concerné. Cette réduction doit être confirmée *via* une évaluation environnementale sur l'ensemble du périmètre (émetteur de CO_2 et utilisateur de CO_2). Pour les unités de biocarburants 2G[6], il n'existe pas encore d'unité industrielle mais il est envisageable de mettre en place du CCS, cela dépendra de la localisation des futurs sites.

Il serait aussi possible de capter le CO_2 sur les unités de pyrogazéification. Dans ce travail de prospective, il a été estimé que certaines futures unités de pyrogazéification pourraient représenter un gisement intéressant avec un volume de 10 à 70 ktCO_2/an pour des unités moyenne à importante en fonction des scénarios. Pour les unités de méthanisation, le flux de CO_2 en sortie est concentré, voire quasi pur après la séparation du biométhane, ce qui représente un avantage en termes de coût de captage (coût beaucoup plus réduit). Il serait possible de mettre en place

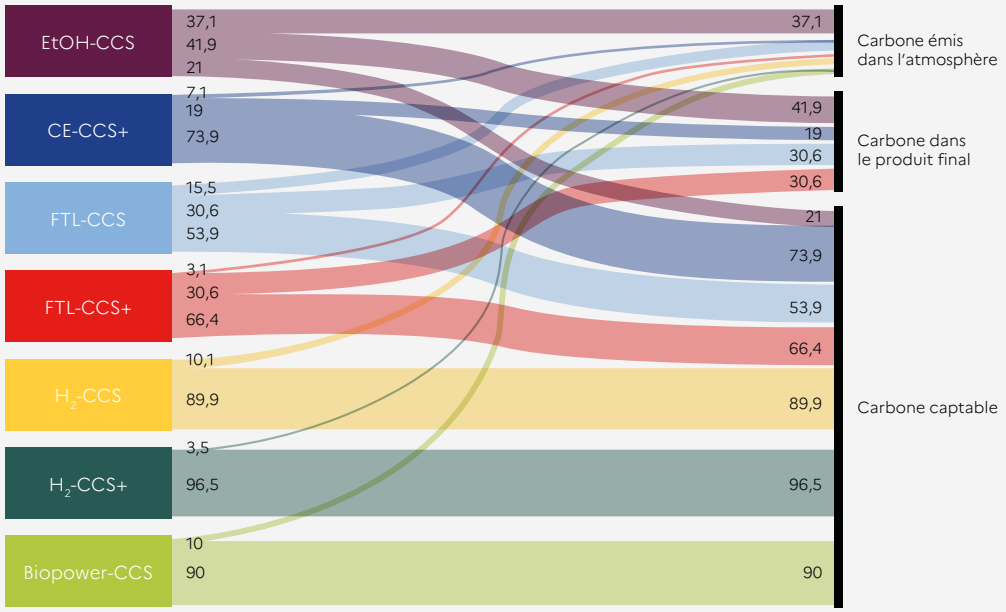
4 Taux de change à 0,87 EUR pour 1 USD en novembre 2021.
5 Le *calcium looping* est une technologie de captage utilisant un système de boucle chimique pour séparer le CO_2 des fumées. La boucle chimique consiste en un oxydant (en général un oxyde métallique) qui réagit avec le CO_2, puis la réaction d'oxydation permet de régénérer à nouveau l'oxyde tout en libérant le CO_2.
6 Les biocarburants 2G sont obtenus à partir de la voie de gazéification de la biomasse (procédé B-t-L) (*cf.* chapitre *2.3.4 Carburants liquides*).

du CCS sur des unités de méthanisation mais un volume important d'émissions de CO_2 (supérieur à 20 ktCO_2/an) serait nécessaire pour en justifier la mise en place. Or, en général les unités de méthanisation sont de petite taille (volume d'émission de CO_2 inférieur à 5 ktCO_2/an) ce qui exclut la mise en place de CCS pour les considérer comme une source de puits de carbone ou de manière marginale en fonction du scénario. Toutefois, le CO_2 issu de la méthanisation représente une source de carbone intéressante (peu coûteuse et distribuée sur tout le territoire) qui peut être utilisée directement comme matière première pour la synthèse de produits : électro-carburants fabriqués à partir d'hydrogène électrolytique et de CO_2, produits chimiques ou matériaux (*cf.* chapitres *2.3.1. Mix gaz*, *2.3.4. Carburants liquides* et *2.3.5. Hydrogène*). Ces procédés sont réunis sous le terme de valorisation du CO_2[7].

Les différents procédés de transformation de la biomasse conduisent à des volumes d'émissions de CO_2 différents et à des fumées de CO_2 avec des concentrations variées. Seule une partie de ce carbone biogénique pourra être captée et stockée. La *Figure 6* récapitule les volumes de CO_2 qui peuvent être récupérés entre les différentes filières de la biomasse-énergie. En fonction du procédé de transformation de la biomasse, seule une fraction du carbone est incluse dans le produit final et le reste est réémis dans l'atmosphère. Parmi le CO_2 réémis, une part peut être captée et une autre partie est réémise. La figure décrit la part de CO_2 qui pourrait être captée pour chaque procédé [32] :

- production d'électricité à partir de la biomasse avec CCS (Biopower-CCS) ;
- production d'hydrogène *via* la biomasse avec CCS (H_2-CCS) ;
- production de bioéthanol avec CCS (EtOH-CCS) ;
- production de biocarburants 2G avec CCS (FTL-CCS et FTL-CCS+ si tout le CO_2 est capté).

Figure 6 Balance carbone de certaines voies de biocarburants/bioénergies en considérant un input biomasse 100 C



Source : [32].

7 Avis ADEME sur la valorisation du CO_2 : https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/1331-filieres-de-valorisation-du-co2-État-de-l-art-et-avis-d-experts-les.html.

PUITS TECHNOLOGIQUE PUR : COUPLAGE DU CAPTAGE DIRECT DE L'AIR (*DIRECT AIR CAPTURE*) AVEC LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE

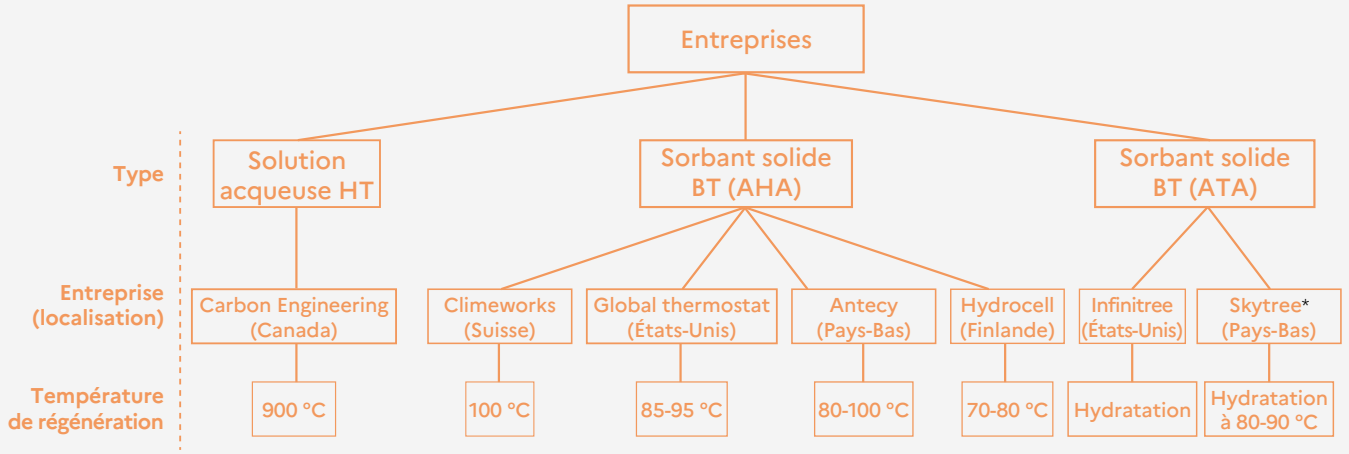
Une autre technologie pourrait conduire à des niveaux importants de séquestration de carbone : le captage du CO_2 atmosphérique pour le stocker dans le sous-sol (DACCS en anglais). Cette technologie consiste en un procédé chimique pour capter le CO_2 de l'air, le concentrer et l'injecter dans un réservoir géologique pour le stocker. Le CO_2 est capté en mettant de l'air en contact avec des bases liquides ou solides pour le lier chimiquement, puis il est relargué en chauffant le système [19]. Cette dernière étape, très consommatrice en énergie, nécessite de l'énergie décarbonée pour maximiser l'effet puits de carbone de la technologie [33] [34].

Cette technologie est encore au stade de développement. Il s'agit d'une technologie très énergivore et consommatrice de ressources [35]. D'un point de vue énergétique, les chiffres annoncés varient de 2,8 à 1,5 MWh/tCO_2 capté à comparer à 0,38 MWh/t CO_2 capté pour des fumées de centrale électrique gaz[8]. La consommation d'eau est de 90 m³ pour 1 tonne de Ceq soustraite[9] et l'occupation des sols est de 100 m² pour 1 ktCO_2 capté par an pour les chiffres les plus bas annoncés. Cela pose la question de la pertinence de son développement et de son impact sur le système électrique [36]. En effet, plusieurs analyses poussées ont montré que les besoins en énergie et en matériaux des DACCS sont irréalistes dans le cas d'une absorption massive du CO_2 (de 5 Gt à 30 Gt de CO_2), y compris lorsque les technologies les plus prometteuses sont utilisées [37]. L'efficacité en termes de CO_2 réellement éliminé varie de 97 % à 9 % en fonction de l'empreinte carbone de l'énergie utilisée [38].

Plusieurs compagnies développent des solutions DAC basées sur deux principes : absorption liquide ou adsorption solide (*Figure 7*).

Les rares démonstrateurs de cette technologie se situent essentiellement aux États-Unis et au Canada. Parmi les initiatives en cours, à citer le pilote de 4 000 tCO_2/an mis en place par Climeworks en Islande pour le capter et le stocker dans le sous-sol basaltique sous forme de minéral [39], l'objectif étant de démontrer la synergie entre le DAC et le stockage *in situ* minéral [40]. Cette expérimentation servira à la montée en échelle d'une future unité de 100 ktCO_2/an. La France ne compte encore aucun développement sur le DAC et ses promoteurs n'envisagent pas encore son déploiement à large échelle à court terme.

Figure 7 *Liste des compagnies développant des technologies DAC*



* Absorption électrostatique et désorption par hydratation.
Abréviations : HT : haute température, LT : basse température, AHA : adsorption par humidité alternée, ATA : adsorption par température alternée.

Source : [34].

8 Il s'agit d'une des sources d'émissions avec l'une des plus faibles concentrations de CO_2, 5 % de concentration (se référer à l'avis ADEME technique CCS pour plus de détails).
9 Pour une technologie de captage aux amines.

2.3. Les matériaux : un puits encore marginal

L'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre évalue uniquement le puits de carbone dans les produits bois [11]. Actuellement, l'usage des autres produits biosourcés ou autres matériaux séquestrant du CO_2 est marginal. Ils ne sont pas considérés dans l'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre.

Au niveau national, le puits de carbone dans les produits bois est estimé à moins de 1 $MtCO_2$ en 2018. Par ailleurs, il tend à diminuer depuis 1990. La durée de vie de ces produits bois pouvant être relativement longue – de 50 à 100 ans selon les structures –, le développement des produits bois pourrait constituer un élément intéressant dans le développement du « puits de carbone » au niveau national. Néanmoins, la tendance est actuellement à la réduction de la durée de vie des produits bois, ce qui pourrait amener ce réservoir à devenir une source de carbone. Par ailleurs, la gestion de la fin de vie est primordiale, car son impact est important. Si le bois en fin de vie est réutilisé ou valorisé à des fins énergétiques, il peut encore contribuer à réduire les émissions du secteur, mais une mauvaise gestion de cette fin de vie peut annuler le gain précédent [41].

Dans un contexte de développement de la valorisation du CO_2, des travaux sont en cours pour l'utiliser dans la production de matériaux tels que du béton. Ce procédé permet de stocker du CO_2 de manière permanente tout en offrant de nouveaux produits. Même s'il peut être considéré comme un puits de carbone, la capacité à séquestrer le CO_2 est très limitée, 2-3 % de la masse finale du produit dans le cas de ces nouveaux bétons. Son potentiel en termes de séquestration de carbone est donc très faible. De plus, c'est la demande du marché qui va orienter la production de ces nouveaux produits et non le besoin en séquestration.

La carbonatation du CO_2 permet aussi de stabiliser et améliorer les propriétés des déchets du BTP qui peuvent être utilisés comme minéral à carbonater. En France, le projet FastCarb [42] consiste à développer, à l'échelle commerciale, des procédés de carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé. Le but est d'améliorer la qualité des granulats pour une plus forte réutilisation dans le marché du bâtiment. Actuellement, la norme limite la quantité de granulats issus de déchets de démolition qui peuvent être introduits dans de nouveaux bétons entre 0 et 60 % selon le type de granulat recyclé et la classe d'exposition du béton. Dans le cadre de ce projet, l'objectif est d'augmenter le taux d'incorporation dans le béton. Les travaux ont estimé un potentiel de 1 $MtCO_2$/an sur la base d'un taux de recarbonatation de 50 $kgCO_2$/t de granulats et un gisement annuel de 20 Mt de granulats de béton recyclé [43]. Cette consommation de CO_2 doit être mise au regard des émissions du secteur cimentier, qui représentent plus de 10 $MtCO_2$/an en France. Le secteur du traitement des déchets étudie également l'application de la carbonatation du CO_2 pour traiter les déchets dangereux. Les matériaux fabriqués à partir de la carbonatation des déchets peuvent être réutilisés pour des usages assez limités (ex. : remblais de route) mais ils n'ont pas vocation à être utilisés comme des matériaux de construction. Comme pour les CO_2-bétons, la part du CO_2 dans les agrégats est très faible. Le premier intérêt de la démarche est de neutraliser les résidus fortement alcalins en abaissant leur pH.

2.4. Les biochars : des produits et marchés à caractériser

L'usage des biochars est très peu développé en France, notamment en agriculture qui pourrait être le principal débouché permettant de séquestrer du carbone de manière significative. Même s'il existe potentiellement une grande diversité de biochars, les gisements et les effets sur les cultures sont encore mal caractérisés, de même que leur stabilité sur le long terme. Actuellement, aucune réglementation claire n'encadre leur utilisation, que ce soit en termes de contexte, de quantité ou de qualité avérée (potentiel agronomique, stockage de carbone…). Malgré tout, certains produits commerciaux commencent à être diffusés sur le marché. En France, un seul produit a été autorisé pour une période spécifique de test de 10 ans, avec nécessité de fournir des résultats complémentaires concernant l'efficacité au champ et la toxicité, dans le contexte de la rétention de l'eau (n° d'AMM 6150003 délivré en 2015). Des évolutions règlementaires sont en cours, en particulier dans le cadre du règlement (CE) n° 2003/2003 sur les matières fertilisantes, pour lequel la Commission européenne a lancé une consultation publique[10] relative à l'inclusion d'une catégorie de matière constitutive dédiée pour les cendres, le biochar et la struvite. Cette consultation permettra de valider l'inclusion de ces matières dans le Règlement Fertilisant et devrait aboutir à une révision du règlement 2003/2003 courant 2022.

10 https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12136-Fertilisants-matieres-issues-de-la-pyrolyse-et-de-la-gazeification_fr.

3. Méthode et outils de quantification des scénarios

Dans les scénarios ADEME, sont considérés deux types de puits :

- **les puits dits « naturels »** intégrant l'impact des changements d'affectation des sols, des pratiques agricoles et de la gestion forestière sur les stocks de carbone dans les sols et la biomasse (végétaux, produits bois…) ;
- **les puits dits « technologiques »** liés aux technologies de captage et de stockage géologique de carbone (BECCS, DACCS).

Aucun levier anthropique d'accroissement du puits dans les milieux marins et littoraux n'a pu être pris en compte en l'absence de références nationales.

Les matériaux à base de minéraux pouvant séquestrer le CO_2 (hors produits bois), les produits biosourcés et les amendements (biochars, silicates) n'ont pas été inclus en raison du manque de données et d'études permettant d'évaluer leur potentiel au niveau français.

Selon les scénarios, les évolutions des stocks de carbone dans les différents réservoirs et les niveaux de puits dépendent largement des choix de l'usage des terres, de l'intensité des prélèvements de biomasse et des usages de ces biomasses : maintien dans les milieux et retour au sol, alimentation humaine et animale, matériaux, énergie, captage et stockage technologique du CO_2.

L'importance relative des différents puits, en particulier « naturels » et BECCS, dans les scénarios dépend donc étroitement des hypothèses émises sur les besoins de biomasses alimentaires et non alimentaires.

3.1. Prise en compte de l'effet du changement climatique

Les principaux puits estimés dans le cadre de l'exercice sont liés à la forêt, à l'agriculture et aux technologies de captage et de stockage géologique. Ce sont donc les effets potentiels du changement climatique sur ces puits qui sont ici discutés.

POUR LES ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

Les premiers effets du changement climatique sont observés depuis quelques années, avec l'augmentation des épisodes de sécheresse, de tempêtes et de crises sanitaires (ex. : scolytes) qui impactent fortement les peuplements forestiers. Ces crises, dont on attend des occurrences plus fréquentes dans les décennies à venir, affectent fortement les services rendus par les forêts et tout particulièrement la séquestration de carbone et la production de bois. La mise en place de stratégies d'adaptation permettant d'augmenter la résilience des écosystèmes est donc d'ores et déjà indispensable. Néanmoins, les différentes stratégies envisagées font l'objet de débats. Dans cet exercice, nous avons tenu compte de l'impact du changement climatique en nous appuyant sur les scénarios réalisés par [9] pour des évolutions climatiques RCP 8.5. L'effet du scénario climatique RCP 8.5 peut se résumer par un ralentissement généralisé de la croissance et une forte accentuation de la mortalité, limitant ainsi le puits de carbone à l'horizon 2050 sans l'annuler. Les modélisations ne tiennent pas compte d'une augmentation de l'occurrence et/ou de l'intensité d'aléas biotiques (insectes et pathogènes) et abiotiques (sécheresse, gel, tempête, feu), qui pourraient également limiter l'accumulation de carbone dans les écosystèmes forestiers [9]. Par ailleurs, le modèle utilisé n'intègre pas l'effet de la densité d'arbres sur l'accroissement biologique (*i.e.* densité-dépendance), ce qui irait également dans le sens d'une surestimation du puits. L'utilisation du RCP 8.5, aujourd'hui considéré comme improbable car supposant un redéveloppement des énergies fossiles (y compris charbon), permet de limiter les risques de surestimation du puits.

Pour les sols forestiers, il n'existe pas de projections considérées comme fiables pour la France, d'autant plus qu'aucun modèle de dynamique du carbone n'est validé [44]. Dans le cadre de cet exercice, nous n'avons pas considéré d'impact significatif du changement climatique pour la séquestration du carbone dans les sols forestiers pour les quatre scénarios.

POUR LES ÉCOSYSTÈMES AGRICOLES

À l'horizon 2050, les impacts du changement climatique sur les stocks de carbone dans les sols agricoles sont également difficiles à estimer. En effet, ils concernent à la fois la production de biomasse, donc les entrées de carbone dans le sol et la vitesse de minéralisation de la matière organique du sol, donc les sorties de carbone [45]. De façon générale, l'augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère aurait un effet bénéfique sur la production de biomasse, mais la diminution des précipitations dans certaines régions limiterait la production sauf en cas d'irrigation possible. Dans le même temps, il faut considérer les effets combinés de la température et de l'humidité sur la minéralisation de la matière organique du sol. Une moindre humidité du sol ralentirait la minéralisation de la matière organique mais l'augmentation de la température aurait l'effet inverse. Des approches de modélisation sont généralement utilisées pour analyser ces effets aux échelles régionales et nationales.

En agriculture, l'impact du changement climatique questionne la pérennité du stockage de carbone lié à la mise en œuvre de certaines pratiques agricoles, en particulier les couverts et cultures intermédiaires. Pour la France métropolitaine, [45] ont analysé par modélisation l'effet du scénario RCP 8.5 (période 2030-2060) sur les potentiels de séquestration de carbone associé aux principales pratiques culturales favorables au stockage de carbone. Le climat modifié ne remet pas en cause les ordres de grandeur du stockage évalué en climat récent. Cet effet modéré du changement climatique dans un futur proche s'explique par la compensation partielle au niveau national entre les effets sur la production de biomasse et ceux sur la minéralisation. À l'échelle régionale, des écarts apparaissent cependant : la minéralisation s'accentue sur une large moitié est et diminue dans un gros quart nord-ouest, les entrées de carbone diminuent dans les zones maïsicoles car le maïs est plus affecté que les autres cultures par la diminution de la ressource en eau. C'est d'ailleurs un point critique car la quantité d'eau d'irrigation est doublée : les cultures irriguées reçoivent en moyenne 167 mm dans un climat modifié, contre 82 mm dans le climat actuel. Les auteurs concluent que le maintien de rendements constants impliquera de réfléchir à irriguer moins intensément mais sur une plus grande surface ou à mettre en place des pratiques et des rotations limitant les besoins en eau. En climat changeant, l'accroissement et le maintien des stocks de carbone dans les sols doivent donc être étroitement reliés à la problématique de la gestion quantitative de l'eau et à la préservation de la capacité des sols à la stocker.

Pour les prairies permanentes, les incertitudes liées aux modélisations sont aujourd'hui considérées plus importantes que pour les cultures. Des simulations réalisées à l'échelle nationale avec le modèle PASIM, développé par l'INRAE, indiqueraient que l'effet du changement climatique serait faible pour un réchauffement modéré (RCP 4.5 à l'horizon 2060) mais que le puits tendrait à se réduire pour un réchauffement plus important (RCP 8.5) [46], sans néanmoins remettre en cause l'importance des stocks de carbone qu'ils représentent.

Dans le cadre de cet exercice, nous n'avons pas considéré d'impact significatif du changement climatique pour la séquestration du carbone dans les sols dans les quatre scénarios. Dans le scénario tendanciel, un développement de l'irrigation permet un stockage additionnel lié aux pratiques agricoles.

POUR LES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE ET STOCKAGE GÉOLOGIQUE

Le BECCS dépend fortement de la disponibilité de la biomasse pour une utilisation dans le secteur de l'énergie (biomasse énergie, biogaz ou biocarburants). Tout ce qui a été dit précédemment sur l'impact du changement climatique sur les productions agricoles et les systèmes forestiers est donc aussi valable pour le BECCS qui dépend du développement de la biomasse comme ressource. La partie CCS est peu sensible au changement climatique car il s'agit d'une technologie faisant appel au sous-sol ou à des équipements technologiques. Les contraintes portent essentiellement sur les ressources (ex. : disponibilité en eau).

Le DACCS est une technologie dont la mise en œuvre est essentiellement dépendante de la disponibilité des ressources et de l'énergie, donc peu sensible au changement climatique.

Dans le cadre de cet exercice, il n'a pas été considéré d'impact significatif du changement climatique sur ces technologies dans les scénarios étudiés.

3.2. Approche quantitative de la séquestration dans les scénarios

Les approches utilisées pour quantifier les scénarios sur les puits de carbone « naturels » sont les suivantes *(Tableau 1)* :

- pour les forêts restant forêts[11] :
  - les estimations sur la séquestration dans **la biomasse forestière et les bois morts** s'appuient sur l'étude de [9], qui associe des niveaux de séquestration de carbone à des intensités de pré-

11 Hypothèses faites dans le cadre d'un scénario RCP 8.5 utilisé pour limiter les risques de surestimation du puits en climat changeant.

lèvements de bois jusqu'à l'horizon 2050 (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*) ;
- les estimations sur la séquestration de carbone dans **les sols forestiers** de Métropole s'appuient sur la valeur basse des références proposées par [10]. On considère ainsi que chaque hectare de forêt métropolitaine séquestre + 130 kgC/an dans les premiers 30 cm de sol. Cette valeur a été privilégiée pour tenir compte d'éventuels effets de saturation sur la séquestration à l'horizon 2050. En l'absence de référence, les effets des modifications de gestion forestière (notamment de l'intensité des prélèvements) n'ont pas été pris en compte ;

- pour les changement d'occupation des terres :
  - l'impact des changements d'occupation des terres (ex. : afforestation, imperméabilisation des sols) sur les stocks de carbone est calculé à l'aide du volet Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêts de l'outil ClimAgri® [47], qui compare les états des stocks de carbone entre différentes années. Pour passer en flux annuel, **les évolutions des stocks de carbone dans les sols sont réparties sur une période de 20 ans**, en ligne avec les préconisations des lignes directrices du GIEC [48]. Un gain de 45 tC/ha sur une période de 30 ans est considéré pour la biomasse aérienne lors de l'afforestation[12]. L'effet du déboisement sur la biomasse aérienne est immédiat ;
  - les stocks de carbone dans les sols pour les occupations des terres (forêts, terres arables, prairies permanentes, autres espaces naturels) concernent les **30 premiers cm de sol** et sont repris de [10], eux-mêmes calculés à partir de la première campagne de prélèvement (2000-2009) du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (www.gissol.fr). On considère que les espaces verts présentent des valeurs similaires à celles des espaces naturels, forestiers et agricoles (ENAF) comparables. Cette convention vaut pour les sols, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus par [17] pour la ville de Paris ou la végétation. En ligne avec les méthodes de l'inventaire national réalisé par le CITEPA [49], on considère une valeur de 30 tC/ha pour les sols imperméabilisés et de 9 tC/ha pour la litière forestière ;

- pour les prairies permanentes restant prairies permanentes :
  - on considère un flux de séquestration de + 110 kgC/ha/an, valeur basse proposée par [10] ;

- pour les terres arables restant terres arables :
  - on considère initialement un déstockage de - 170 kgC/ha/an, valeur basse proposée par [10]. Ce déstockage est lié aux changements d'affectation des sols antérieurs à la période de calcul. Dans les scénarios, nous considérons une réduction linéaire de ce déstockage dans le temps, qui devient nul en 2050 ;

- pour les pratiques agricoles :
  - les pratiques agricoles considérées sont le développement des couverts végétaux en intercultures, l'allongement des prairies temporaires, le retour au sol de nouvelles ressources organiques, l'agroforesterie intraparcellaire, l'implantation de haies, la gestion des prairies (intensification des prairies peu productives, passage fauche vers pâture), le semis direct et l'enherbement des inter-rangs en cultures pérennes (vignes et vergers). Les pratiques à plus fort potentiel au niveau national sont l'agroforesterie et les haies, les couverts végétaux et l'allongement des prairies temporaires ;
  - l'impact généré par la mise en œuvre de pratiques agricoles « stockantes » est évalué sur la base des références proposées par [10]. Concernant les sols, c'est l'horizon 0-30 cm qui est considéré,

Tableau 1 Stocks de carbone dans la matière organique du sol (hors litière et sols imperméabilisés) par mode d'occupation du sol pour l'horizon 0-30 cm

	Stock de carbone [tC/ha]	Écart-type	Surface [Mha]	Stock total [MtC]
Prairie permanente	84,6 ± 2,8	35	9,3	790
Terres arables (grandes cultures et prairies temporaires)	51,6 ± 1,1	16,2	18,4	950
Forêts	81 ± 2,9	35,4	16,9	1 370
Autres milieux naturels	79	-	6	475
TOTAL	**-**	**-**	**50,6**	**3 585**

Source : données RMQS – GIS Sol [10].

12 Plantation d'arbres ayant pour but d'établir un état boisé sur une surface longtemps restée dépourvue d'arbre, ou n'ayant éventuellement jamais (aux échelles humaines de temps) appartenu à l'aire forestière.

pour être en cohérence avec les références utilisées pour les changements d'occupation des sols. Il est à noter que cela sous-estime le potentiel de séquestration pour la plupart des pratiques agricoles, exception faite du semis direct, dont l'effet sur les stocks de carbone est en moyenne nul si l'on considère l'ensemble du profil de sol ;

- pour les produits bois :
  - la séquestration liée au développement des produits bois issus de sciages, panneaux ou pâte à papier est calculée sur la base d'un bilan entre les entrées de nouveaux produits et leur sorties (dégradation, combustion), en ligne avec la méthode appliquée pour l'élaboration de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) (tableur de travail communiqué par le ministère de la Transition écologique). Il y a séquestration de carbone dans le réservoir produits bois si les entrées de produits bois augmentent plus que les sorties ;
  - par défaut, on prend en compte des temps de demi-vie de 35 ans pour les sciages, 25 ans pour les panneaux et 2 ans pour la pâte à papier. C'est-à-dire que 50 % des sciages produits une année sont réémis sous forme de CO_2 en 35 ans. Pour les scénarios les plus sobres (S1 et S2), on considère une augmentation de la durée de demi-vie.

Les flux de séquestration et les émissions liées au déstockage de carbone sont exprimés en tCO_2eq en multipliant les tonnes de carbone par 44/12, soit le rapport entre la masse molaire du CO_2 et celle du carbone.

LA SÉQUESTRATION DE CARBONE PAR LES TECHNOLOGIES DE CAPTAGE ET STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO_2

- Identification du potentiel de BECCS par scénario : Les puits technologiques, BECCS et DACCS, sont très consommateurs d'énergie et de ressources et n'ont pas la même efficacité de séquestration de carbone. Celle-ci dépend de plusieurs paramètres à prendre en compte pour identifier la technologie la plus efficace : facilité à capter du CO_2 (concentration du flux de CO_2, volume…), faible consommation énergétique du procédé ou accès à de l'énergie décarbonée. Ces critères devraient piloter le choix du puits technologique à mettre en place. Plus précisément, il est important de rappeler que la consommation énergétique du système de captage est directement liée à la concentration en CO_2 de la source captée. Donc, le CO_2 de l'atmosphère sera toujours la source la plus diluée et la moins intéressante à capter.

Pour la mise en place de CCS, **la taille de l'unité est un paramètre important**. Le CCS est une technologie développée pour des installations fortement émettrices de CO_2 (supérieur à 100 $ktCO_2$/an), c'est-à-dire utilisant des volumes importants de ressources (ici biomasse). Les scénarios 1 et 2 ont pour but de préserver au maximum les puits naturels et de favoriser une utilisation matière de la biomasse. Ainsi, les unités prévues pour la production d'énergie à partir de biomasse (ex. : unité de méthanisation) sont de petites tailles. Il n'y a donc pas de BECCS envisagé dans ces deux scénarios. Pour S3, dans lequel l'utilisation de la biomasse-énergie est plus importante mais sur des unités moyennes, il est considéré que du captage de CO_2 est installé sur des unités moyennement émettrices (volume d'émissions de CO_2 entre 10 à 50 $ktCO_2$/an). Ainsi, le BECCS est déployé sur des chaudières biomasse de taille moyenne pour de la production de chaleur dans l'industrie ou le résidentiel (réseau de chaleur) et sur des unités de traitement des déchets. Dans S4, la biomasse est largement utilisée pour la production d'énergie ou la production de produits énergétiques (gazeux et liquides) avec le développement de grosses unités. Il est ainsi considéré un large déploiement du BECCS dans ce scénario, sur des chaudières biomasse mais aussi sur des unités de pyrogazéification, de méthanisation, de bioraffineries et des unités de traitement des déchets.

Pour la mise en place de CCS, il est nécessaire d'identifier des sites de stockage géologique à proximité des unités équipées en captage pour limiter le transport du CO_2. Dans S3, peu de sites de stockage géologique se développent sur le territoire et donc les unités BECCS sont concentrées et proches des sites de stockage géologique (avec une possibilité de transporter le CO_2 sur 300 km). Pour S4, dans lequel il est considéré un large développement du CCS dans l'industrie avec le développement d'infrastructures de transport de CO_2 et de sites de stockage géologique sur tout le territoire, toutes les unités utilisant de la biomasse pour la production d'énergie et pouvant mettre en place un système de captage sont éligibles au BECCS.

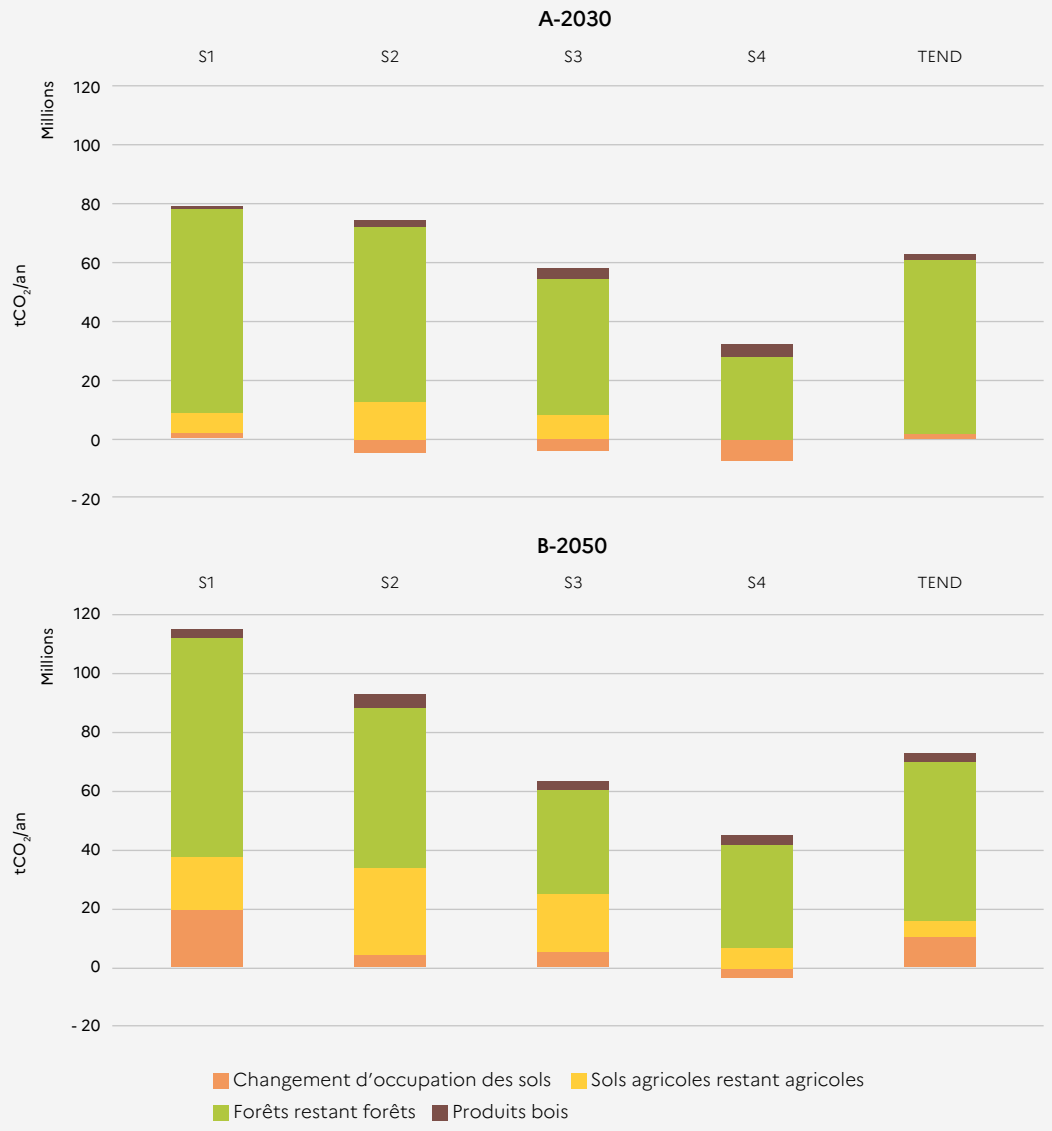
- Identification du potentiel de DACCS par scénario : Le DACCS n'a été considéré que pour S4 qui est le seul scénario nécessitant de le mettre en œuvre pour atteindre la neutralité carbone. Il n'y a pas de contrainte sur la localisation de la mise en place de DACCS car il s'agit de CO_2 atmosphérique qui est capté. Les unités peuvent donc être installées à proximité des sites de stockage. La principale contrainte porte sur l'énergie nécessaire pour les alimenter en électricité et en chaleur. En première approximation, il a été considéré que de l'électricité renouvelable serait utilisée par le DAC avec une consommation moyenne de 1,5 MWh/tCO_2 (hypothèse forte sur la réduction de la consommation d'énergie de la technologie car S4 correspond au scénario du pari technologique avec un très fort soutien au développement des technologies).

4. Stratégie pour le secteur selon chaque scénario

4.1. Des niveaux de puits naturels contrastés selon les scénarios

L'évolution des puits naturels résulte de celle des usages des terres, de l'agriculture, de la gestion forestière et des usages des biomasses présentés dans les chapitres précédents *(Graphique 3)*. Nos estimations s'appuient sur les méthodes et références présentées en *section 3* de ce chapitre.

Graphique 3 *Puits naturels de carbone en 2030 (A) et 2050 (B) dans la biomasse et les sols*



Note de lecture : le stockage de carbone dans les sols est considéré uniquement sur une profondeur de 0-30 cm. C'est le bilan net du changement d'occupation des sols qui est représenté contrairement au *Graphique 2*.

Tableau 2 Puits naturels de carbone en 2050

$MtCO_2$/an	TEND	S1	S2	S3	S4
Biomasse vivante	51	79	55	28	22
Sol	14	27	27	28	11
Bois mort en forêt	5	6	5	4	5
Produits bois	3	4	5	4	3
TOTAL	**73**	**116**	**93**	**64**	**41**

Les scénarios se distinguent par des niveaux de puits naturels très contrastés à l'horizon 2050, allant de 116 $MtCO_2$eq/an pour S1 à 41 $MtCO_2$eq/an pour S4. Cela s'explique principalement par les hypothèses très différentes en termes d'intensité de la récolte en forêts (ici, caractérisée par la catégorie « forêts restant forêts ») (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*), le développement de pratiques agricoles « stockantes » (en particulier, les couverts végétaux, les haies et l'agroforesterie intraparcellaire) (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*) et les évolutions de l'occupation des sols : maîtrise de l'artificialisation, afforestation, devenir des prairies permanentes *(Graphique 4)*. Le puits dans les produits bois reste faible à l'horizon 2050 et est maximal dans S2 (+ 4,79 $MtCO_2$ eq/an) qui présente l'orientation la plus importante de la récolte vers des usages à longue durée de vie (panneaux et sciages). Quels que soient les scénarios, cette augmentation reste cependant limitée par rapport à l'hypothèse prise dans la SNBC 2 et ce en raison à la fois d'intensités de récolte bien inférieures (pour S1 et S2), de volumes de déchets de bois disponibles à cet horizon également plus restreints et d'une demande en bois énergie plus contrainte. Les puits de carbone sont plus faibles en 2030 qu'en 2050, en raison de la mise en œuvre progressive des actions sur le changement d'occupation des sols et les pratiques agricoles au cours de la période.

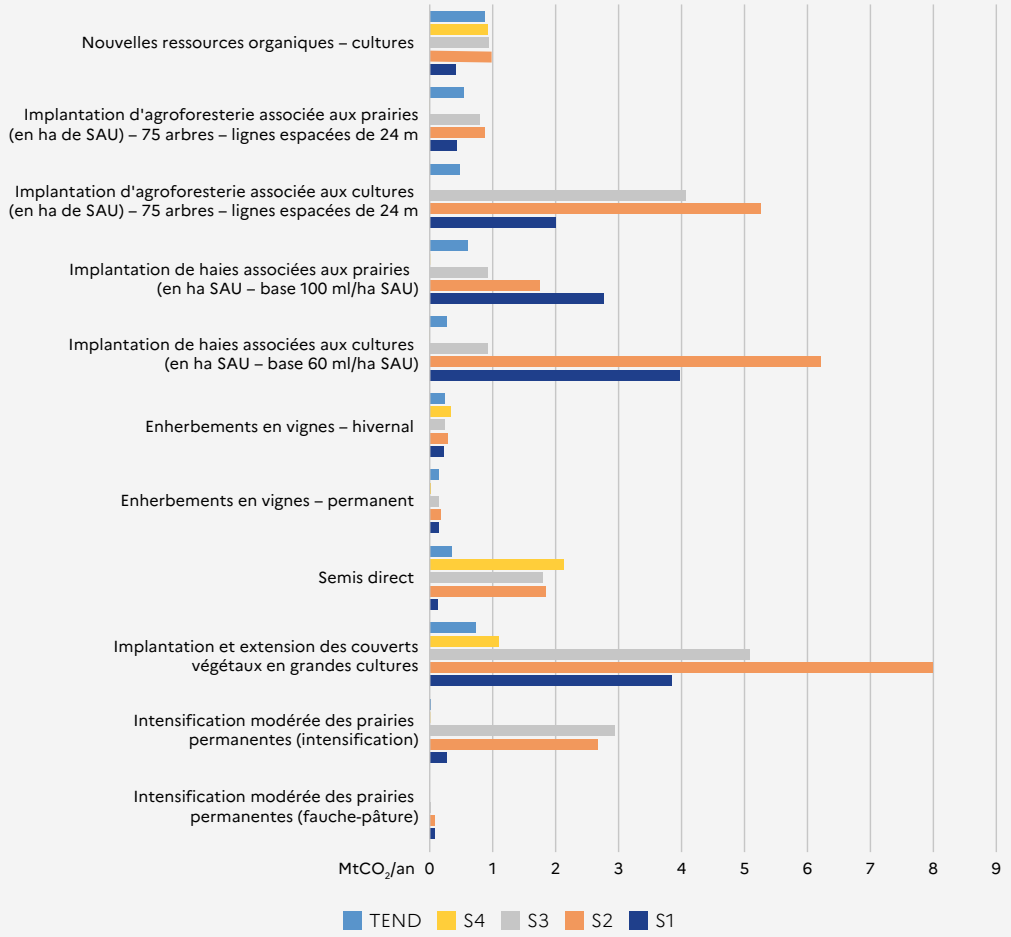
Le **scénario 1** réduit drastiquement l'artificialisation des sols et maximise le rôle de stockage de carbone dans les écosystèmes, tout particulièrement forestiers (niveau de prélèvement maintenu à l'actuel, forte afforestation). La séquestration de carbone dans les sols agricoles est plus faible que dans S2 et S3 en raison d'une surface agricole cultivée moins importante et de rendements en biomasse réduits, notamment pour les couverts végétaux, enfouis plus précocement en agriculture biologique.

Le **scénario 2** s'appuie davantage sur l'évolution des pratiques agricoles pour favoriser le stockage de carbone dans les sols, tout particulièrement par l'implantation de haies et de l'agroforesterie intraparcellaire (pratique la plus efficace en matière de stockage) ainsi que par le développement des couverts végétaux pour préserver les sols et leur fertilité. Les niveaux de prélèvements de bois en forêts restent modérés, ce qui permet le maintien d'un puits de carbone important en forêt. L'artificialisation des sols est fortement réduite. On note néanmoins une réduction des surfaces en prairies permanentes et prairies temporaires due à la réduction de l'élevage résultant de l'évolution des régimes alimentaires.

Le **scénario 3** prévoit un développement plus important de la demande en biomasse, ce qui explique une dynamisation de la récolte de bois par rapport à l'actuel et une réduction du puits forestier par rapport à S1 et S2. La séquestration de carbone sur sols agricoles est principalement portée par le développement des couverts végétaux, notamment valorisés en méthanisation. Les haies et l'agroforesterie se développent à un niveau moindre que dans S1 et S2 et lorsqu'elles trouvent une valorisation économique suffisante (ex. : bois énergie, paiements pour services environnementaux).

Le **scénario 4** présente le puits naturel le plus faible. Le rythme d'artificialisation est maintenu par rapport à l'actuel, la tendance au retournement des prairies au profit des céréales se poursuit. Le puits forestier est similaire à celui de S3. Les sols cultivés augmentent faiblement les stocks de carbone *via* le développement des couverts végétaux, en lien avec la méthanisation principalement.

Graphique 4 Séquestration de carbone en $MtCO_2$/an par les pratiques agricoles dans les différents scénarios pour l'horizon 2050



N.B. : la profondeur de sol considérée est 0-30 cm. Cela explique un stockage lié au semis direct. Si l'ensemble du profil de sol est considéré, le stockage de carbone est accru pour toutes les autres pratiques et considéré comme nul pour le semis direct strict.

4.2. Potentiel très variable des puits technologiques

Les scénarios se distinguent par des niveaux de puits technologiques très contrastés à l'horizon 2050, allant de 0 pour S1 à 56 $MtCO_2eq$/an pour S4 (dont 27 $MtCO_2eq$/an pour le DACCS). Cela s'explique principalement par les hypothèses très différentes concernant le développement du CCS et le recours à la biomasse pour l'énergie. Les puits technologiques de S3 et S4 sont supérieurs à la valeur de la SNBC 2 (10 $MtCO_2eq$/an). Dans cette dernière, il a été considéré la mise en place de CCS sur des chaudières biomasse dans l'industrie et l'énergie (réseaux de chaleur), ainsi que, dans une moindre mesure, sur les centrales à (bio)gaz.

Le **scénario 1**, caractérisé par une sobriété forte sur l'usage des biomasses alimentaires et non alimentaires, réduit le développement de l'utilisation de la biomasse pour l'énergie (hors usages traditionnels) et sans stockage géologique : aucun puits technologique de type BECCS ne peut donc être mis en œuvre. Le **scénario 2** présente une consommation supérieure de la biomasse par rapport à S1 mais il s'agit de petites unités qui se développent localement. Le BECCS n'a été considéré que sur les unités industrielles ayant mis en œuvre du CCS et utilisant du gaz réseau qui en 2050 contient une forte proportion de renouvelable. La part de renouvelable est variable en fonction des scénarios. Ici, le BECCS représente 700 $ktCO_2$/an.

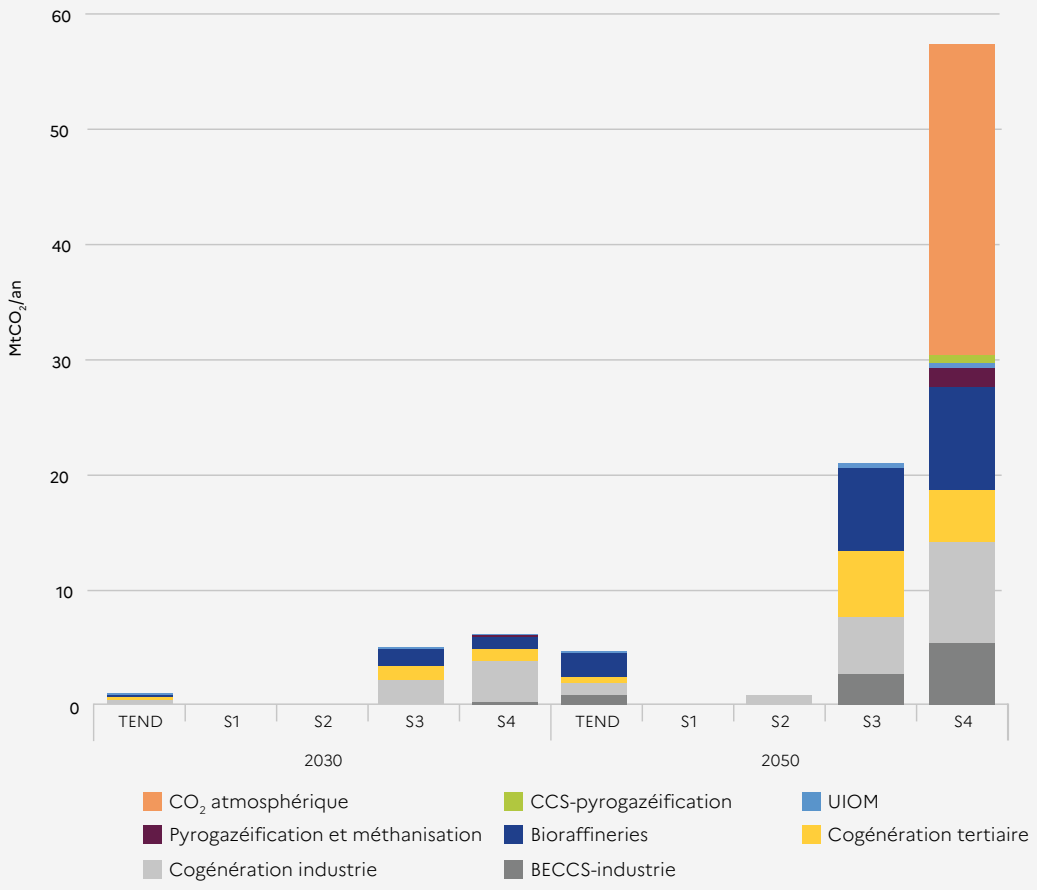
Le **scénario 3** prévoit un développement plus important de la demande en biomasse pour des unités de taille moyenne de chaudières. La mise en place de BECCS se focalise donc sur les chaudières biomasse (pour industrie ou réseau de chaleur pour le résidentiel) où il est possible de stocker du CO_2. Le développement de CCS dans les territoires fortement industriels conduit également au développement du BECCS au sein de l'industrie avec le développement de ressources renouvelables comme la biomasse ou

l'utilisation du gaz de réseau qui contient une part importante de renouvelable. Ainsi, en considérant les sites industriels utilisant le gaz du réseau et équipés de CCS, la part du BECCS est de 2,5 $MtCO_2$/an. Les UIOM sont aussi équipées de CCS quand il est possible de stocker le CO_2. Le BECCS se développe de manière localisée dans ce scénario à hauteur de 21 $MtCO_2$/an.

Le **scénario 4** présente le besoin en puits technologiques le plus important au regard du niveau des émissions de CO_2 à compenser (56 $MtCO_2$/an) et le plus bas potentiel en puits naturels (41 $MtCO_2$/an). Il s'agit du scénario avec un fort développement du CCS sur tout le territoire grâce au développement des infrastructures nécessaires (canalisations de transport de CO_2 et sites de stockage géologique) et une large utilisation de la biomasse pour la production d'énergie. La combinaison de ces deux technologies conduit au développement important du BECCS : 29 $MtCO_2$/an. Le DACCS doit également être mis en œuvre, à hauteur de 27 $MtCO_2$/an. La consommation électrique équivalente a été estimée et prise en compte avec l'hypothèse de 1,5 MWh/tCO_2 soit 40 TWh/an de consommation totale d'électricité pour le DACCS. En comparaison avec S3, S4 est le scénario avec la part la plus importante en puits technologiques ce qui se traduit par une très forte consommation énergétique de 50 TWh/an à comparer aux 6 TWh/an de S3.

Le *Graphique 5* montre l'évolution des puits technologiques dont les différentes sources de CO_2 biogéniques pour le BECCS entre 2030 et 2050. Les bioraffineries représentent la grande majorité de la part du BECCS en 2050 dans S3 avec 33 % du CO_2 capté soit 7 $MtCO_2$/an car il s'agit du scénario avec un fort développement des biocarburants issus de la gazéification de la biomasse lignocellulosique (*cf.* chapitre *2.3.4. Carburants liquides*). La deuxième source importante de CO_2 biogénique provient des chaudières biomasse pour le résidentiel avec une part de 28 % soit 5,8 $MtCO_2$/an en 2050 dans S3. En cumulant les émissions captées des chaudières biomasse pour la production de chaleur dans l'industrie et dans le résidentiel, cette source devient majoritaire avec plus de 10,8 $MtCO_2$/an soit 51 % du total de BECCS. Dans S4, les émissions biogéniques captées des bioraffineries sont équivalentes à celles des émissions captées des chaudières biomasse de l'industrie à hauteur de 18 $MtCO_2$/an environ ce qui représente 62 % des émissions totales captées pour le BECCS. L'autre part importante provient des émissions des chaudières biomasse pour le résidentiel (soit 4,7 $MtCO_2$/an) et les chaudières gaz industrielles (5,4 MtCO2/an). Dans les deux scénarios, S3 et S4, les unités de pyrogazéification, de méthanisation et des UIOM représentent une part mineure du BECCS.

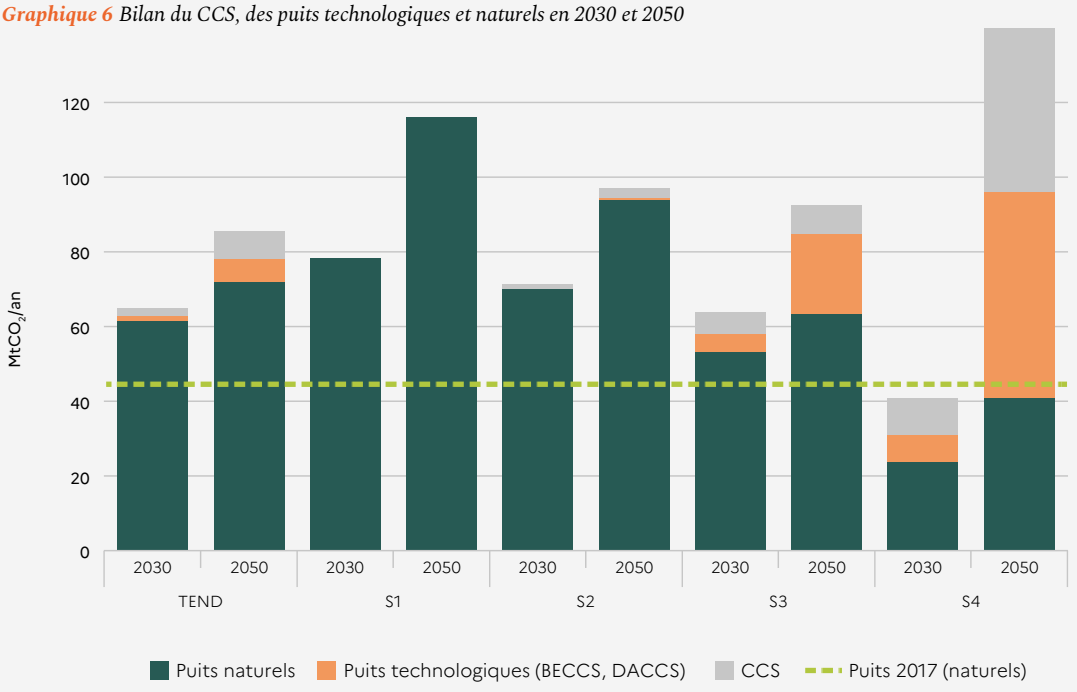
Graphique 5 Évolution temporelle entre 2030 et 2050 du BECCS sur les différentes sources utilisant la biomasse comme matière énergétique



4.3. Bilan des puits

Au bilan, tous les scénarios montrent une augmentation de la séquestration de carbone d'un facteur 2 à 3 par rapport à 2017 *(Graphique 6)*. Dans les deux premiers scénarios, cette augmentation repose principalement sur les puits naturels tandis qu'elle repose majoritairement sur le CCS et les puits technologiques dans S3 et S4, scénarios qui présentent des puits naturels inférieurs au tendanciel et même inférieurs à 2017 pour S4.

Graphique 6 Bilan du CCS, des puits technologiques et naturels en 2030 et 2050

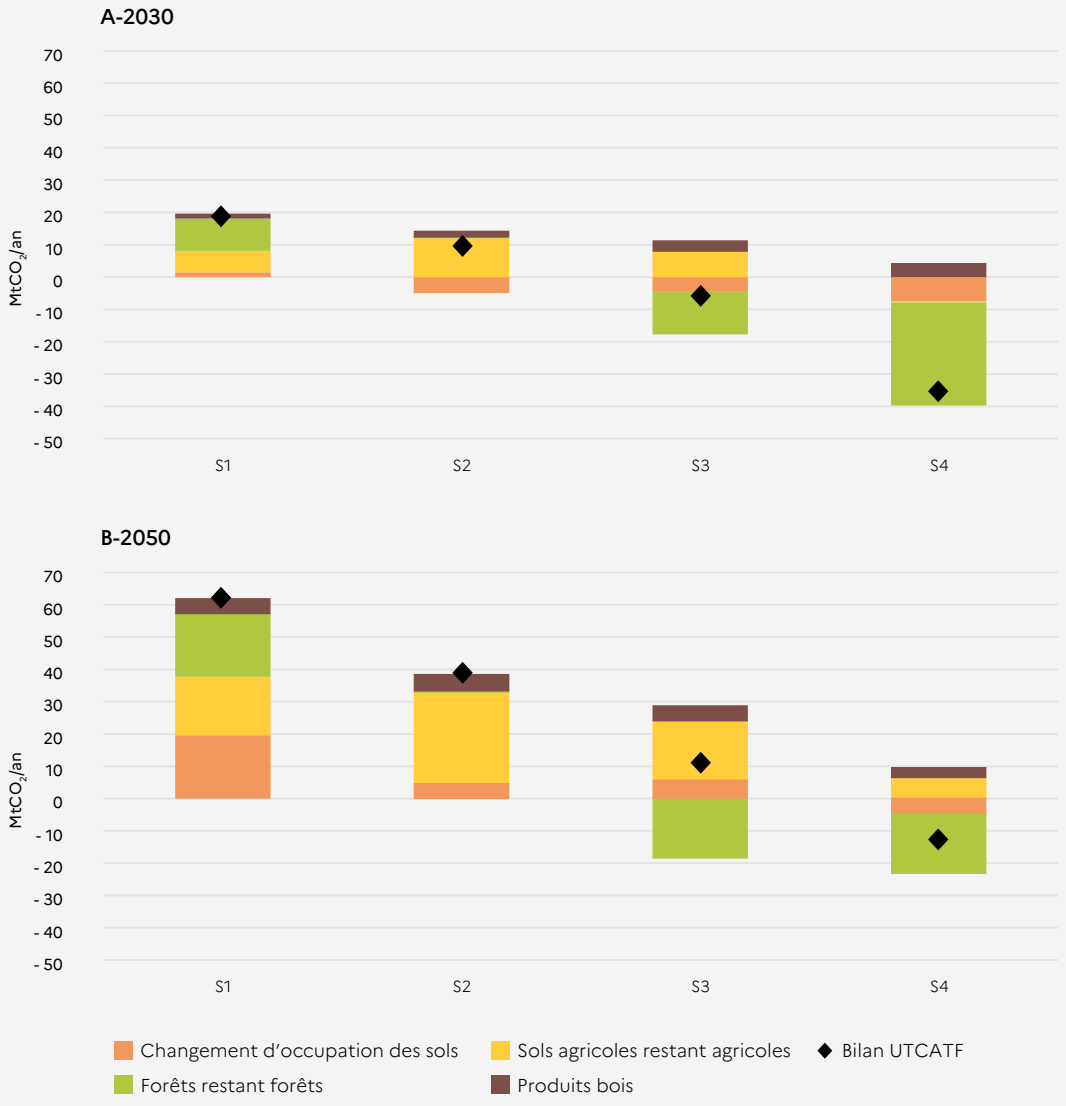


N. B.: la valeur du puits en 2017 est présentée comme référence sachant qu'elle n'a pas été calculée avec la même méthode que pour les scénarios mais à partir des valeurs de l'inventaire national réalisé par le CITEPA, en y ajoutant la séquestration de carbone dans les sols forestiers et le bois mort en forêt.

4.4. Spécificités de la comptabilité des puits liés à l'usage des terres dans le cadre du rapportage « Climat »

Le secteur UTCATF (Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Foresterie) est régi par des règles de comptabilisation et des modalités de rapportage très spécifiques dans le cadre du Protocole de Kyoto et de la réglementation européenne. Dans le cadre de la politique climat de l'UE, en particulier dans le cadre du règlement 2018/841 [50], la partie du bilan UTCATF lié à la gestion forestière est comparé à un niveau de référence (*cf.* chapitre *2.2.2. Production forestière*). Ce niveau de référence est une projection de ce qui aurait été attendu si aucune mesure supplémentaire n'avait été mise en place. Pour les forêts gérées, un puits supérieur au niveau de référence est à comptabiliser dans la partie séquestration de carbone et un puits inférieur à la valeur du scénario de référence est à comptabiliser dans la partie émissions de carbone, car toute réduction du puits contribue à augmenter la quantité de carbone dans l'atmosphère. L'objectif est que la valeur de puits calculée selon cette méthodologie reste positive pour le secteur UTCATF dans son ensemble. Nous illustrons cette comptabilité dans le *Graphique 7* en utilisant le scénario tendanciel comme niveau de référence. Selon cette comptabilité, S4 a un impact négatif sur le secteur UTCATF que ce soit en 2030 ou 2050 car le puits dans les forêts gérées y est fortement réduit par rapport au tendanciel, sans qu'il y ait une compensation par l'agriculture, l'afforestation et/ou les produits bois.

Graphique 7 Estimation du puits UTCATF en 2030 et 2050, en comptabilisant la partie du bilan UTCATF liée à la gestion forestière par rapport à un niveau de référence (ici, le scénario tendanciel)



N.B. : pour rappel, dans ce graphique, les pertes de puits par rapport au tendanciel sont représentées en négatif.

5. Enseignements pour le secteur et propositions de politiques et mesures

LES PUITS NATURELS, PILIERS DE LA NEUTRALITÉ CARBONE

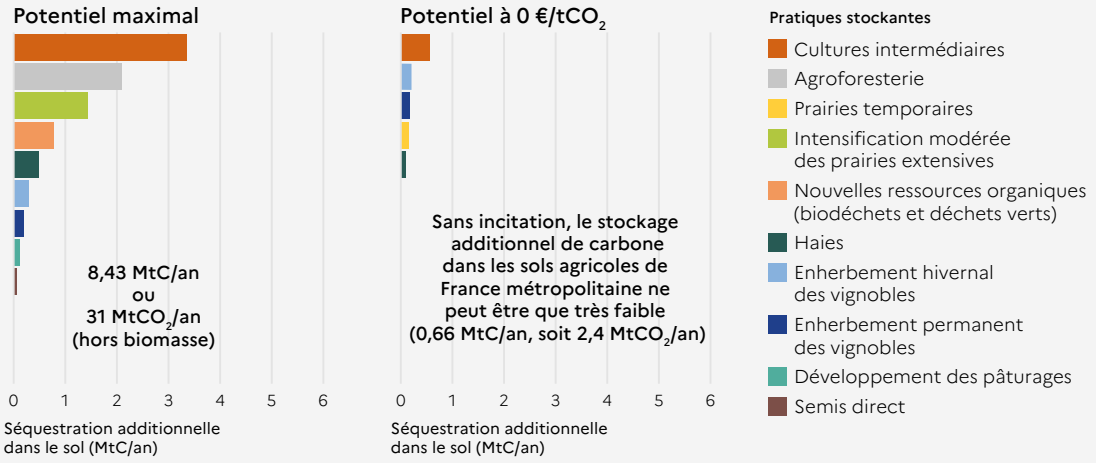
Quels que soient les scénarios, la séquestration de carbone dans les puits « naturels » joue un rôle essentiel dans l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050 à l'échelle nationale :

- **la forêt reste dans tous les cas le principal stock de carbone**. Elle est également le principal puits de carbone excepté dans S4 où les puits technologiques prennent la relève à l'horizon 2050. La priorité est donc de favoriser des pratiques de gestion sylvicole et un niveau de récolte de bois permettant de préserver le puits de carbone et d'identifier et d'accompagner les mesures d'adaptation à mettre en œuvre pour la rendre résiliente aux effets du changement climatique (ex. : gestion adaptative, diversification des essences et des itinéraires sylvicoles). Ces mesures seront bénéfiques quel que soit le niveau de puits, car des dégradations trop importantes pourraient mener à une réduction des stocks et donc à faire de la forêt une source d'émissions, y compris pour S3 et S4. Il est à noter que le puits dans les produits bois reste marginal dans tous les scénarios ;

- **les changements d'affectation des terres sont aussi un déterminant majeur des évolutions des stocks de carbone**. L'afforestation, la préservation des milieux naturels riches en carbone et une réduction drastique de l'artificialisation des sols et des déboisements sont des enjeux importants dans les scénarios qui séquestrent le plus dans les réservoirs naturels. Sur le territoire national, cela passe notamment par un renforcement des politiques publiques visant la préservation et la restauration des milieux naturels (ex. : développement des aires protégées), la valorisation des prairies permanentes (ex. : *via* les aides de la politique agricole commune) et la mise en œuvre du Zéro Artificialisation Nette (prévu dans le Plan Biodiversité et définit par la loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets). Cela implique également d'agir sur les changements d'affectation des terres (déforestation, pertes de zones humides) liés aux importations, en particulier pour l'énergie (ex. : sortie des biocarburants présentant un fort risque de changement d'affectation des sols indirects) et l'alimentation animale (ex. : réduction de l'import de tourteaux de soja et renforcement de l'autonomie protéique des exploitations d'élevage) ;

- **l'agriculture peut jouer un rôle significatif dans la séquestration**, principalement *via* le développement de l'agroforesterie, des haies et des couverts végétaux. Ce potentiel peut être activé en moins de 10 ans car les pratiques sont déjà connues. Néanmoins, il peut être affecté de manière importante par les tensions sur la ressource en eau. Sa réalisation dépendra donc des effets du changement climatique au niveau local et devra s'accompagner de pratiques permettant une gestion économe de l'eau. Par ailleurs, les pratiques « stockantes » présentent dans la plupart des cas un coût additionnel variable pour l'agriculteur [10] *(Graphique 8)*. Même si elles peuvent présenter des intérêts agronomiques ou zootechniques, leur déploiement à large échelle et leur pérennisation (pour éviter un déstockage par la suite) nécessiteront le développement d'un conseil dédié et des aides financières – probablement combinées – telles que les aides de la politique agricole commune et le développement de débouchés comme les bioénergies, les paiements pour services environnementaux, les crédits carbones et la valorisation auprès du consommateur.

Graphique 8 Potentiel maximal de stockage de carbone dans les sols agricoles (hors biomasse) de France (assiette technique) et sans incitation financière



Source : [10].

Le développement de cadres officiels d'évaluation de projets favorables à la séquestration additionnelle de carbone et à la réduction des émissions de GES, comme le Label Bas Carbone ou le cadre de certification européen en cours de définition par exemple, permettront également d'orienter les actions et financements du secteur privé vers les projets les plus vertueux (ex. : compensation carbone ou contribution volontaire, finance verte). Ces cadres doivent être conçus pour tenir compte de l'ensemble des impacts sur le climat (pas uniquement la séquestration de carbone) [51] ainsi que des autres enjeux environnementaux et sanitaires: biodiversité, ressource en eau, usage de produits phytosanitaires...

Enfin, il apparaît essentiel de renforcer les moyens alloués aux dispositifs de suivi des évolutions des stocks et puits de carbone dans les écosystèmes, en particulier *via* l'inventaire forestier national, le dispositif national de suivi du bocage (haies), les enquêtes sur les pratiques agricoles et le réseau français de mesure de la qualité des sols (RMQS). À titre d'exemple, 15 années ont séparé les deux premières campagnes du RMQS [52]. Ce renforcement permettra également de mieux appréhender et anticiper les impacts du changement climatique.

Les puits technologiques n'ont pas tous le même potentiel ni surtout le même impact en fonction des scénarios :

- **les puits technologiques ne sont pas indispensables pour atteindre la neutralité carbone**. Dans S1, une forte sobriété permet de se passer de puits technologiques. À l'opposé, S4, qui se caractérise par une forte consommation de matières et d'énergie sans un effort important de réduction d'émissions de CO_2, est le seul scénario nécessitant la mise en place de tous les puits technologiques, BECCS et DACCS. Le DACCS se caractérise par une forte consommation d'énergie et de ressources, ce qui se traduit par des impacts négatifs sur le système énergétique ou sur l'environnement (impacts sur la consommation d'eau et l'occupation des sols) et sur la biodiversité ;

- **contrairement aux BECCS et DACCS, le CCS est une technologie nécessaire pour que l'industrie réduise les émissions incompressibles**. Dans le cas de la mise en place de BECCS, substituer la ressource fossile utilisée par ces unités industrielles par de la biomasse permettrait de limiter le coût de déploiement du BECCS et d'optimiser l'utilisation des infrastructures CCS déjà en place. La principale alerte sur le développement du BECCS est le volume de biomasse nécessaire, ce qui pose la question de la durabilité de la ressource, de la réduction des puits naturels et de la maîtrise de la concurrence avec la production alimentaire face à un fort besoin d'en produire pour répondre à cette nouvelle utilisation ;

- **étant donné le temps nécessaire pour le déploiement des technologies DAC, le DACCS risque de ne pas être opérationnel suffisamment tôt pour aider à atteindre la neutralité carbone en 2050**. En effet, il y a un besoin important de réduire les émissions de CO_2 avant 2050 pour limiter les effets du changement climatique. Contrairement au DACCS, le CCS et le BECCS pourraient être mis en place dès 2030 et conduire rapidement à la réduction des émissions de CO_2. Les principaux verrous sont liés au coût de ces technologies et à l'opposition sociétale face au stockage géologique du CO_2. Pour lever la barrière de l'opposition sociétale, de nombreux projets se développent en offshore. Demeure la question du coût, qui peut être levée avec une taxe carbone élevée.

6. Limites des scénarios, autres possibles, perspectives pour travaux futurs

PUITS NATURELS OU PUITS TECHNOLOGIQUES : UN POTENTIEL DIFFICILE À ANTICIPER

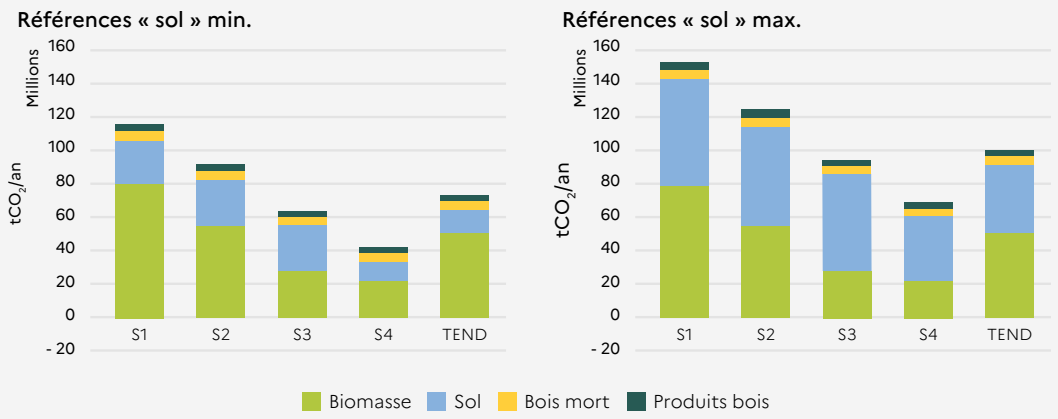
6.1. Les puits naturels : des incertitudes fortes concernant les impacts du changement climatique

Dans cette partie, nous préciserons les limites de l'approche quantitative des puits de carbone sans traiter les limites relatives aux hypothèses sur l'évolution de l'occupation des sols, des pratiques agricoles, de la gestion forestière et des usages des biomasses. Celles-ci sont traitées dans les chapitres respectifs.

Plusieurs limites à l'évaluation des puits et potentiels de séquestration « naturels » peuvent être notées :

- concernant l'évolution des stocks de carbone dans les sols :
  - les valeurs de stocks de carbone de référence et l'impact moyen des pratiques agricoles (issus d'une modélisation spatialisée sur l'ensemble de la France métropolitaine) peuvent être considérés comme relativement robustes. Au contraire, l'évolution tendancielle des stocks de carbone (ligne de base) fait l'objet d'incertitudes importantes, quelle que soit l'occupation des sols [10]. La seconde campagne du Réseau de Mesure de la Qualité des sols (2016-2028) [52] devrait permettre d'affiner les estimations et d'améliorer les modèles ;
  - on estime que près de 50 % du carbone organique des sols est présent dans les horizons profonds au-delà de 30 centimètres de profondeur. Ce carbone peut être affecté par les changements d'occupation des sols et les pratiques agricoles [53]. Ce compartiment pourrait représenter un potentiel de stockage additionnel significatif, comme l'illustre le *Graphique 9*. Des travaux de recherche sont nécessaires pour mieux appréhender ce potentiel ;
  - l'effet de la gestion forestière sur le stockage de carbone dans les sols est très mal connu et n'a pas pu être représenté, alors que, dans certains cas, l'augmentation des prélèvements de bois et le travail du sol sont connus comme des pratiques pouvant affecter le stockage de carbone dans les sols forestiers [8] ;
  - l'effet de la gestion des espaces verts ou le développement des toitures végétalisées n'ont pas non plus pu être pris en compte. Néanmoins, le potentiel national est relativement faible au regard des surfaces considérées, ce qui ne devrait pas affecter significativement les résultats ;
  - l'évolution du carbone inorganique (ex. : carbonates) n'est pas prise en compte en l'absence de références ;

Graphique 9 Sensibilité des estimations de puits de carbone « naturels » aux hypothèses relatives à la séquestration de carbone dans les sols



Note de lecture : sans (graphique de gauche) et avec (graphique de droite) prise en compte des valeurs hautes de séquestration dans les sols forestiers et de prairies et de la séquestration liée aux pratiques agricoles dans l'ensemble du profil de sol (profondeur maximale de 1 m).

Source : [10].

- concernant les impacts du changement climatique :
  - les estimations proposées supposent une disponibilité en eau et des conditions climatiques proches de celles connues dans les dernières décennies. Les impacts actuels et futurs du changement climatique sur les écosystèmes, notamment les événements extrêmes (leur récurrence, leur intensité, leurs impacts), font l'objet d'incertitudes fortes, qui pourront affecter négativement les puits de carbone naturels et éventuellement les stocks de carbone, tout particulièrement en forêts [54] [9]. Le potentiel de séquestration additionnelle de carbone lié aux pratiques agricoles peut également être affecté. Les auteurs de [45] montrent ainsi, par modélisation, que le potentiel de séquestration lié aux couverts végétaux en interculture estimé par [10] serait réduit si l'irrigation n'était pas accrue ;

- concernant la prise en compte de pratiques agricoles innovantes :
  - l'apport de biochars ou de silicates n'a pas été considéré, alors que la littérature internationale identifie ces amendements comme à fort potentiel [5] [6]. Néanmoins, très peu de références existent dans le contexte national (stockage de carbone potentiel, modalités de mise en œuvre, évaluation des ressources disponibles…). Des approches en analyses de cycle de vie conséquentielles sont également nécessaires pour préciser l'impact de leur développement sur le climat ;
  - l'acquisition de nouvelles connaissances, le développement d'expérimentations sur le terrain et l'amélioration des modèles tels que les couverts permanents, les cultures semi-pérennes (ex. : miscanthus, silphie) et l'agroforesterie intraparcellaire permettraient de mieux prendre en compte des pratiques agricoles innovantes à fort potentiel ;

- concernant la non-prise en compte des changements d'affectation des sols hors du territoire national :
  - l'évolution de l'usage des terres, des niveaux de production et de consommation modifient les marchés des matières premières agricoles à l'international et peut occasionner des changements d'affectation des sols à l'étranger. Ces changements d'affectation des sols peuvent être la cause de déstockage de carbone, en particulier s'ils s'opèrent sur des milieux riches en carbone (forêts, zones humides). Leur estimation suppose l'utilisation de modèles économiques à l'échelle globale. Cela n'a pas pu être réalisé dans le cadre de cet exercice, alors que les niveaux d'importations et d'exportations de produits agricoles et alimentaires vont différer de manière importante entre les scénarios (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole*) ;

- concernant la non-prise en compte « du carbone bleu » :
  - les puits et potentiels de séquestration liés à l'action de l'homme dans les milieux marins et littoraux n'ont pas pu être pris en compte en l'absence de références nationales. En l'état des connaissances [4], ce puits est faible en Métropole, mais des travaux sont à mener pour le confirmer.

6.2. Puits technologiques : le poids du mix énergétique

Du point de vue de la temporalité concernant le déploiement des technologies, il est peu probable que le DACCS puisse atteindre le niveau nécessaire de captage pour les enjeux de neutralité carbone d'ici 2030 et soit donc pertinent pour 2050. Le DACCS risque d'être plus consommateur d'énergie et de capitaux que des solutions efficientes de réduction d'émissions de CO_2.

Dans S3 et S4, le développement du BECCS est envisagé pour réaliser un puits carbone technologique. Or, le BECCS a besoin des infrastructures du CCS qui est peu développé dans S3. Cela pose véritablement la question d'un développement du BECCS si le CCS n'a pas été mis en place et donc s'il faut développer les infrastructures notamment pour les équipements de liquéfaction et de transport du CO_2. De plus, parier sur le stockage géologique de CO_2 est une vraie gageure étant donné l'opposition sociétale actuelle face à cette technologie. La mise en place de grands projets de stockage géologique avec plusieurs millions de tonnes de CO_2 injectées par an semble vraiment difficile à imaginer en 2021 – et pas plus facile en 2030 et même en 2050. Un pari a été fait dans S4 sur un fort développement du stockage géologique du CO_2 avec l'utilisation des réservoirs en France. Sans la possibilité de mettre en place des sites de stockage sur le territoire, il sera difficile d'atteindre les chiffres modélisés avec le CCS, BECCS et même DACCS.

En plus de la problématique sur le stockage géologique, l'approvisionnement en biomasse pour les unités utilisant des grandes quantités de biomasse comme les unités industrielles (ex. : cimenteries) est également un enjeu de taille.

7. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **GIEC**, Rapport spécial – Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie – Résumé à l'intention des décideurs, 2000 (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srl-fr-1.pdf).

[2] **IPCC**, Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)], *in* « Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty » [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], 2018.

[3] **P. Friedlingstein *et al.***, *Global Carbon Budget 2019*, Earth Syst. Sci. Data, 11, 1783-1838 (https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019).

[4] **EFESE**, *La séquestration de carbone par les écosystèmes en France*, 2019 (https://ree.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/thema_-_la_sequestration_de_carbone_par_les_ecosysteme.pdf).

[5] **IPCC**, *Summary for Policymakers*, *in* « Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems » [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)], 2019.

[6] **IPCC**, *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)], 2018.

[7] **Manuel Martin**, « La carte nationale des stocks de carbone des sols intégrée dans la carte mondiale de la FAO », 2019 (https://doi.org/10.15454/JCONRJ), Portail Data Inra, V1.

[8] **ADEME**, *Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique*, 2021 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4647-forets-et-usages-du-bois-dans-l-attenuation-du-changement-climatique-9791029714498.html).

[9] **A. Roux *et al.***, *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050*, Rapport d'étude pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, INRA et IGN, 2017, 101 pages et 230 pages d'annexes.

[10] **S. Pellerin, L. Bamière *et al.***, *Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ?*, Synthèse du rapport d'étude, INRA, 2019, 114 pages.

[11] **CITEPA**, Rapport Secten, édition 2020, 2020 (https://www.citepa.org/fr/secten/).

[12] **GIP ECOFOR**, *Indicateurs de gestion durable des forêts françaises ultramarines de Guyane*, édition 2015 publiée en 2018 (http://www.gip-ecofor.org/wp-content/uploads/2019/03/IGDFF_GUYANE_2015.pdf).

[13] **Guyane Énergie Climat**, GES et forêt – Méthodologie, bilan, analyse, 2016. Téléchargeable sur le site de l'ADEME Guyane (https://guyane.ademe.fr/expertises/observatoires/observatoire-du-carbone).

[14] **Barbier *et al.*, ADEME**, *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation*, partie 2 : « Empreintes des importations agricoles et alimentaires françaises », 2020, 36 pages.

[15] **Qin *et al.***, *Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon*, Nature Climate Change 11, 442-448, 2021 (https://www.nature.com/articles/s41558-021-01026-5).

[16] **F. Tufnell, J. Bignon**, *Terres d'eau, terres d'avenir. Faire de nos zones humides des territoires pionniers de la transition écologique*, 2019 (http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/terres-d-eau-terre-d-avenir-faire-de-nos-zones-a2722.html).

[17] **A. Cambou *et al.***, *Estimation of soil organic carbon stocks of two cities*, New York City/Paris, 2018. Sci Total Environ. Dec 10;644:452-464. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.322. Epub 2018 Jul 11. PMID: 29981995.

[18] **Allory *et al.***, *Quantification of soil organic carbon stock in urban soils using visible and near infrared reflectance spec-troscopy (VNIRS) in situ or in laboratory conditions*, Science of the Total Environment, Elsevier, 2019, in press, 686, p. 764-773. 10.1016/j.scitotenv.2019.05.192. hal-02136840.

[19] **Avis de l'ADEME**, *Captage et stockage géologique de CO_2 (CSC) en France*, 2020 (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/69-avis-de-l-ademe-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france.html).

[20] **S. Gollakota, S. McDonald, T. Dixon, H. Herzog, S. Twinning**, *12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, GHGT-12 Commercial-scale CCS Project in Decatur, Illinois, Construction Status and Operational Plans for Demonstration, Energy Procedia, volume 63, 2014, pages 5986-5993.

[21] **Consoli C.**, *Bioenergy and CCS*, GCCSI, 2019.

[22] **L. Sonter *et al.***, *Carbon emissions due to deforestation for the production of charcoal used in Brazil's steel industry*, Nature Climate Change 5, 2015, pages 359-363.

[23] **Mandova H. *et al.***, *Achieving carbon-neutral iron and steelmaking in Europe through the deployment of bioenergy with carbon capture and storage*, Journal of Cleaner Production, volume 218, 2019, pages 118-129.

[24] **Tanzer S. E. *et al.***, *Can bioenergy with carbon capture and storage result in carbon negative steel?*, International Journal of Greenhouse Gas Control, volume 100, 2020, 103104.

[25] **Patrizio P. *et al.***, *CO_2 mitigation or removal: The optimal uses of biomass in energy system decarbonization*, iScience, volume 24, 2021, 102765.

[26] **Spinelli M. *et al.***, *Integration of Ca-Looping Systems for CO_2 Capture in Cement Plants*, Energy Procedia, volume 114, 2017, pages 6206-6214.

[27] **Ozcan D. C. *et al.***, *Process integration of a Ca-looping carbon capture process in a cement plant*, International Journal of Greenhouse Gas Control, volume 19, 2013, pages 530-540.

[28] **Hills T. P. *et al.***, *LEILAC: Low Cost CO_2 Capture for the Cement and Lime Industries*, Energy Procedia, volume 114, 2017, pages 6166-6170.

[29] **UE**, *Système d'échange de quotas d'émission de l'UE* (https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_fr).

[30] **D. L. Sanchez *et al.***, *Near-term deployment of carbon capture and sequestration from biorefineries in the United States*, PNAS, volume 115, 2018, pages 4875-4880.

[31] **J. Lask *et al.***, *Lignocellulosic ethanol production combined with CCS. A study of GHG reductions and potential environmental trade-offs*, GCB Bioenergy, volume 13, 2021, pages 336-347.

[32] **IEAGHG report-NET's potential**, 2021.

[33] **A. Gambhir, M. Tavoni**, *Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation*, One Earth, volume 1, Issue 4, 2019, pages 405-409.

[34] **M. Fasihi *et al.***, *Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants*, Journal of Cleaner Production, volume 224, 2019, pages 957-980.

[35] **JRC**, *Facts behind the debate – Direct Air Capture (DAC)*, 2020 (https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/factsheet_direct_air_capture_04.pdf).

[36] **G. Realmonte *et al.***, *An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways*, Nature Communications, volume 10, 2019, pages 3277.

[37] **S. Chatterjee, K.W. Huang**, *Unrealistic energy and materials requirement for direct air capture in deep mitigation pathways*, Nature Communication, volume 11, 2020, pages 3287.

[38] **T. Terlouw *et al.***, *Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources*, Environnemental Science Technology 2021, volume 55, 2021, pages 11397-11411.

[39] https://www.carbfix.com/direct-air-capture/.

[40] **Snæbjörnsdóttir *et al.***, *Carbon dioxide storage through mineral carbonation*, Nature Reviews Earth & Environment, volume 1, 2020, pages 90-102.

[41] https://www.chaireeconomieduclimat.org/wp-content/uploads/2019/11/ID-62.pdf.

[42] https://fastcarb.fr/.

[43] **J.M. Torrenti**, « R-108 carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé : le projet FASTCARB », NoMaD : Actes du colloque, 2018 (https://popups.uliege.be/nomad2018/index.php?id=607).

[44] **P. Barré *et al.***, *La séquestration de carbone dans les sols agricoles, forestiers et urbains : état des lieux des méthodes d'évaluation et de quantification*, Étude et Gestion des Sols, 27, 2020, pages 305-320 (https://www.afes.fr/wp-content/uploads/2020/07/EGS_2020_27_Barre_305-320.pdf).

[45] **J. Constantin *et al.***, *Effet du changement climatique sur le stockage de carbone dans les sols de grandes cultures* – Complément au rapport « Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1 000 et à quel coût ? », 2020 (https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20%C3%A9tude%20compl%C3%A9mentaire.pdf).

[46] **R. Massad *et al.***, *Atténuation des émissions des gaz à effet de serre dans les systèmes prairiaux* – Rapport final, ADEME, 2017, 80 pages (https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/1733-attenuation-des-emissions-des-ges-dans-les-systemes-prairiaux.html).

[47] **ADEME**, l'outil ClimAgri® : https://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-agricole/passer-a-laction/dossier/levaluation-environnementale-agriculture/loutil-climagri.

[48] **GIEC**, *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*, 2006 (https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/index.html).

[49] **CITEPA**, 2021. Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France – OMINEA 18e édition (https://www.citepa.org/fr/ominea/).

[50] **UE**, Règlement (UE) 2018/841 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la prise en compte des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie dans le cadre d'action en matière de climat et d'énergie à l'horizon 2030, et modifiant le règlement (UE) n° 525/2013 et la décision (UE) n° 529/2013, 2018 (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0841).

[51] **Yogo *et al.***, *Evaluation and monitoring methodologies for soil carbon balance and recommendations for drafting a low carbon label method*, ADEME Report, Convention 18-03-C0034, 2021 (https://hal.inrae.fr/hal-03326539).

[52] www.gissol.fr.

[53] **Balesdent *et al.***, *Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth*, Nature 559, 599-602, 2018 (https://www.nature.com/articles/s41586-018-0328-3?WT.feed_name=subjects_ecosystem-ecology).

[54] **ONERC**, « L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change », Rapport au Premier ministre et au Parlement de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, La Documentation française, 2015.

8. Annexe : évolution des principales variables du secteur

PUITS BIOLOGIQUES	2017-2018	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Surface forêts et peupleraies en Métropole [Milliers ha]	16 914	18 606	19 769	17 515	17 564	17 264
Surface artificialisée [Milliers ha]	5 263	7 369	5 061	5 567	6 073	7 085
Surfaces toujours en herbe [Milliers ha]	9 317	8 753	8 139	8 466	9 317	8 751
Nouvelles surfaces de terres arables avec agroforesterie intraparcellaire *vs* 2018 [Milliers ha]	N/A	108	496	1 289	1 012	0
Nouvelles surfaces de terres arables avec haies par rapport à 2018 [Milliers ha]	N/A	165	4 240	6 537	985	0
Surfaces de terres arables avec couverts végétaux [Milliers ha]	1 092	2 164	16 549	17 538	11 234	4 918
Nouvelles surfaces de prairies avec agroforesterie intraparcellaire *vs* 2018 [Milliers ha]	N/A	124	99	210	200	0
Nouvelles surfaces de prairies avec haies par rapport à 2018 [Milliers ha]	N/A	619	3 003	1 800	1 005	0
Récolte bois totale [Mm³/an]	52	61	52	61	71	71
Produits bois – sciages [Millions de tonnes/an]	3	3,9	3,9	4,1	4,2	4,4
Produits bois – panneaux [Millions de tonnes/an]	3,5	4,9	5,2	5,7	5,5	5,3
Durée de demi-vie des sciages [Ans]	35	35	37	37	35	35
Durée de demi-vie des panneaux [Ans]	25	25	27	27	25	25

PUITS TECHNOLOGIQUES	2017-2018	2050				
		TEND	S1	S2	S3	S4
Consommation énergétique du système DAC [MWh/tCO_2]	2,8	-	-	-	-	1,5
Consommation énergétique du système BEC [MWh/tCO_2]	-	-	-	0,6	0,7	0,7

3 RÉSULTATS ET ENSEIGNEMENTS

1. SYNOPTIQUE DES RÉSULTATS ET COMPARAISON DES SCÉNARIOS

647 Bilan énergie et GES : périmètre et mise en cohérence des résultats

648 Trajectoires d'évolution des besoins énergétiques

653 Trajectoires 2030-2050 de décarbonation des énergies

660 Agriculture, forêt, espaces naturels et usages de la biomasse : clés de voûte de la transition écologique

664 Bilan des puits naturels et technologiques

665 Émissions nettes de gaz à effet de serre et neutralité carbone

669 Position des scénarios par rapport aux objectifs Énergie-Climat

671 Besoins en matériaux et gestion des ressources non énergétiques

672 Évolutions des émissions de polluants

674 Références bibliographiques

1. Bilan énergie et GES : périmètre et mise en cohérence des résultats

Pour chaque scénario, les données issues des modélisations sectorielles sont synthétisées de façon à croiser le niveau de consommation avec les productions requises et ainsi produire des bilans d'énergie et de gaz à effet de serre détaillés et équilibrés à chaque date de projection. Des corrections sont appliquées aux consommations énergétiques finales fournies par les modélisations sectorielles pour couvrir le champ du bilan énergétique publié par le service statistique du ministère de la Transition énergétique [1]. De fait, le lecteur pourra constater de légères différences de chiffres avec les chapitres sectoriels, sans que cela n'altère les ordres de grandeurs ou les conclusions qui en sont tirées. La production française d'énergie est complétée par des hypothèses d'évolution des importations et des exportations d'énergie. L'approvisionnement qui en résulte pour chaque source d'énergie couvre les besoins de la branche de production et de transformation d'énergie, les pertes de distribution et les consommations nationales, ces dernières comprenant les usages énergétiques et les usages non énergétiques des secteurs comme dans l'industrie.

Ces bilans projetés offrent une vision d'ensemble des niveaux de consommation, de production et de transformation énergétiques réalisés dans chacun des scénarios. En tenant compte des coefficients d'émissions de gaz à effet de serre de chaque énergie (CITEPA [2]), les bilans énergétiques sont utilisés pour calculer les émissions brutes de CO_2 qui résultent de la production et de la consommation d'énergie. Ces émissions énergétiques sont complétées par les autres gaz à effet de serre (gaz fluorés, méthane, protoxyde d'azote)[1] liés aux procédés industriels et agricoles, ainsi qu'à différents usages dans les bâtiments (chauffage, cuisson, réfrigération, climatisation, etc.). Le bilan d'émissions ainsi obtenu est mis en regard des émissions absorbées par les puits naturels (forêts, sols agricoles, produits bois) ou les puits technologiques de captage et stockage géologique de CO_2 (CCS, BECCS et DACCS). Cette synthèse a été reproduite pour chacune des cinq itérations de simulation, de façon à aboutir à une cohérence d'ensemble des bilans pour finalement atteindre des émissions nettes proches de zéro en 2050 et ainsi s'approcher de l'objectif de neutralité carbone (Loi Énergie-Climat, 2019 [3]). Un bilan d'usage des surfaces agricoles utiles et forestières, ainsi qu'un bilan de la disponibilité et des usages des ressources en biomasse et produits biosourcés, complètent la mise en cohérence des résultats. Le respect de ces contraintes physiques est important, étant donné les multiples contributions que l'on attend du monde du vivant dans les stratégies de neutralité carbone.

En partant de la situation historique de 2015, nous présentons d'abord les résultats synthétiques obtenus pour chacun des scénarios aux horizons 2030 et 2050. Puis nous décrivons des indicateurs qui permettent d'apprécier l'atteinte des objectifs, de comparer les cinq trajectoires et de les situer par rapport à la trajectoire du scénario de la SNBC 2 (scénario AMS, SNBC, 2020 [4]). Rappelons que les résultats de bilans d'émissions ne concernent ici que la France métropolitaine. Une estimation complémentaire a été réalisée pour quantifier les besoins énergétiques des trajets internationaux (aériens et maritimes), mais la plupart des résultats qui suivent n'intègrent pas ces besoins (*cf.* chapitre *2.1.3. Mobilités des voyageurs et transport de marchandises*). Les comparaisons avec la SNBC 2 présentées plus bas correspondent au territoire métropolitain, bien qu'il faille rappeler que la SNBC intègre aussi des orientations stratégiques pour les départements et régions d'outre-mer et que les budgets carbone de la France intègrent les départements d'outre-mer.

1 La combustion des énergies produit également des émissions d'autres gaz à effet de serre, en plus du CO_2. Nous ajoutons 1% aux facteurs d'émission de CO_2 du CITEPA pour tenir compte de ces autres gaz.

2. Trajectoires d'évolution des besoins énergétiques

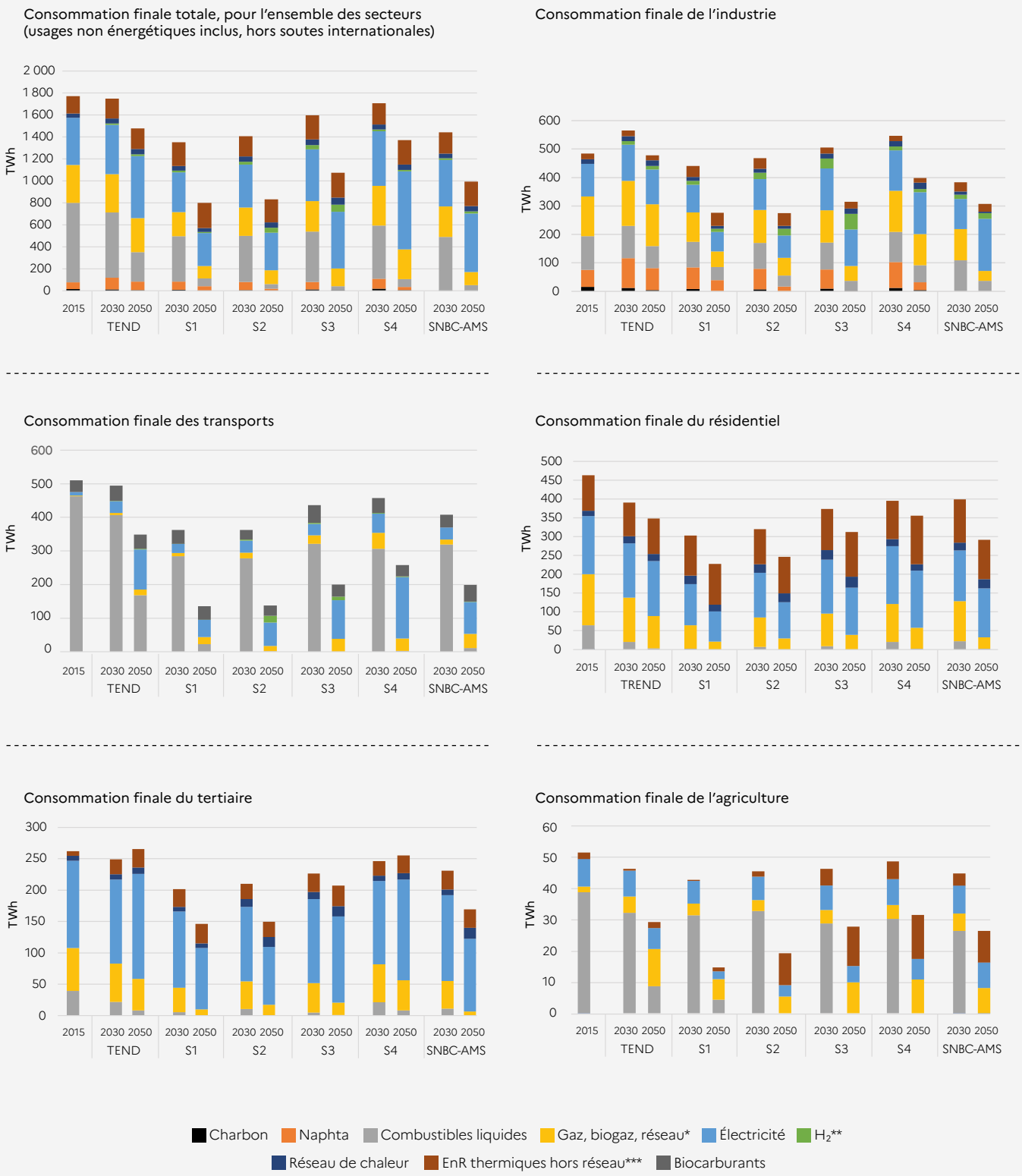
Le *Graphique 1* résume les évolutions des consommations finales par source d'énergie – totales et par secteur consommateur – qui résultent des transformations décrites dans les chapitres sectoriels précédents (*cf.* chapitres *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires*, *2.1.3. Mobilités des voyageurs et transport de marchandises*, *2.2.1. Production agricole*, *2.2.2. Production forestière*, *2.2.3. Production industrielle*). Ces consommations incluent les usages énergétiques et non énergétiques de ces secteurs.

2.1. Une baisse accélérée des consommations d'énergie, mais dont la rapidité et l'ampleur se distinguent fortement selon les scénarios

Dans l'ensemble des scénarios, **l'atteinte de la neutralité carbone suppose une forte baisse des quantités d'énergie finale consommées (de - 23 % à - 55 % par rapport à 2015, selon les scénarios)**, par l'amélioration de l'efficacité des équipements et des procédés, mais aussi par l'évolution des usages vers plus de sobriété. Par rapport à la prolongation des évolutions tendancielles (1 735 TWh en 2030 et 1 466 TWh 2050, contre 1 772 TWh en 2015), la baisse des consommations d'énergie s'amplifie dès 2030 dans tous les scénarios (de 1 338 TWh dans S1 à 1 692 TWh dans S4) et se poursuit au-delà (de 790 TWh dans S1 à 1 360 TWh dans S4 en 2050).

La baisse des consommations est nécessaire dans tous les scénarios en raison des limites techniques et physiques de la production et de la consommation d'énergie décarbonée qui ont été décrites dans les chapitres sectoriels (remplacement des équipements et des techniques, disponibilité des ressources renouvelables, etc.). Elle atténue également l'ampleur des transformations et des investissements nécessaires pour fournir une énergie décarbonée. Selon les scénarios de neutralité carbone, l'ampleur des baisses de consommation d'énergie est toutefois assez différente d'un secteur à l'autre, les secteurs du transport et, dans une moindre mesure, celui de l'industrie contribuant le plus à la baisse en valeur absolue mais aussi en intensité.

Graphique 1 *Évolution des consommations finales totales d'énergie par source et par secteur*

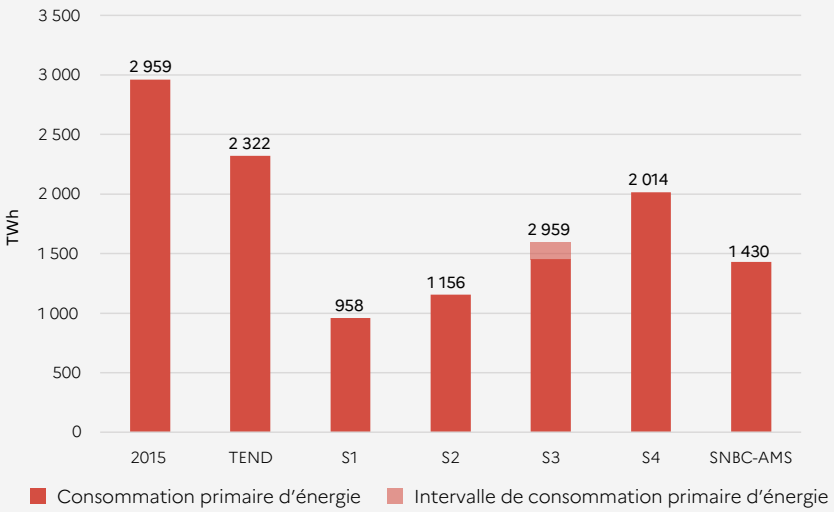


* Le gaz de réseau est alimenté par du gaz naturel, du biogaz et de l'hydrogène dans des proportions qui dépendent des scénarios et des contraintes techniques.
** Hydrogène utilisé uniquement directement. Selon les scénarios, de l'hydrogène est également injecté dans le réseau de gaz et liquifié pour être utilisé comme « combustible liquide ».
*** Les EnR thermiques hors réseaux comprennent l'énergie produite à partir de biomasse et de déchets, les biocarburants, le solaire thermique et la chaleur de l'environnement (pompes à chaleur).
N.B.: la consommation d'énergie finale ne prend pas en compte l'énergie utilisée de façon intermédiaire pour fabriquer d'autres vecteurs énergétiques ou non énergétique comme l'hydrogène par exemple.

Par rapport au scénario AMS de la SNBC 2, la demande d'énergie finale en 2050 est plus faible dans S1 et S2 (de 16 à 20 % de moins), tandis qu'elle est plus élevée dans S3 et S4 (de 8 à 37 % de plus). La production d'énergie décarbonée ou renouvelable requise, ainsi que le développement des puits et du captage du CO_2 pour compenser les émissions résiduelles, sont donc fondamentaux dans S3 et S4 pour être en mesure d'atteindre l'objectif de neutralité carbone.

Les différences de consommation d'énergies en 2050 entre les scénarios sont encore accentuées si on considère l'évolution de la demande en énergie primaire *(Graphique 2)* : la consommation d'énergie primaire dans S1 représente moins de la moitié (47 %) de celle de S4, tandis que l'écart de consommation finale est moins important (58 %). Cette différence s'explique principalement par le recours à l'énergie nucléaire, beaucoup plus important dans S4 que dans S1, dont le rendement énergie primaire-énergie finale est limité par les possibilités de valoriser la chaleur coproduite.

Graphique 2 Évolution des consommations d'énergie primaire entre 2015 et 2050



N.B. : la consommation d'énergie primaire correspond à l'approvisionnement d'énergie pour la transformation d'énergie, les pertes de distribution et la consommation finale domestique, hors soutes internationales. L'approvisionnement en sources d'énergie primaire comprend le charbon, les combustibles liquides (pétrole brut et produits pétroliers raffinés), le gaz naturel, le nucléaire, les EnR électriques, l'hydrogène et les EnR thermiques hors réseau (biomasse, biogaz, biocarburants, déchets, solaire thermique et chaleur de l'environnement récupérée par les pompes à chaleur).
L'intervalle de consommation d'énergie primaire pour S3 correspond aux variantes d'hypothèses sur le mix électrique qui ont été considérées et qui seront présentées dans le feuilleton sur le mix électrique.

2.2. Une diversification du bouquet énergétique pour remplacer les énergies fossiles, avec des marges de manœuvre contraintes

Dans l'ensemble des scénarios, l'atteinte de la neutralité carbone suppose également une forte évolution du mix énergétique, de façon à remplacer presque intégralement les sources d'énergie carbonées en usage direct et indirect (pétrole, gaz fossile et charbon) par des sources d'énergie décarbonées *(Graphique 1)*.

La production et la consommation d'énergie hors réseau se développent dans tous les scénarios (entre + 32 % et + 45 % en 2050 par rapport à 2015) mais ces dernières ne peuvent couvrir l'ensemble des usages en raison des contraintes de gisements et d'exploitation des énergies renouvelables thermiques (pompes à chaleur, usages directs du bois, solaire thermique, biogaz et biocarburants en usage direct). Selon les scénarios, elles couvrent de 11 % à 16 % de la demande finale en 2030, puis de 16 % à 29 % en 2050, contre 9 % en 2015. Plus le niveau de demande est faible (notamment dans S1 et S2), plus elles couvrent une part importante des usages.

Globalement, **le développement des énergies de réseaux (électricité, gaz et réseaux de chaleur)** permet de faire reculer les produits pétroliers dans l'ensemble des usages. Selon les scénarios, l'électricité couvre de 27 % à 29 % de la demande finale en 2030, puis de 38 % à 52 % en 2050 (contre 24 % en 2015), tandis que le gaz de réseau couvre de 16 % à 21 % en 2030 et de 14 % à 20 % en 2050 (contre 19 % en 2015). L'évolution de la

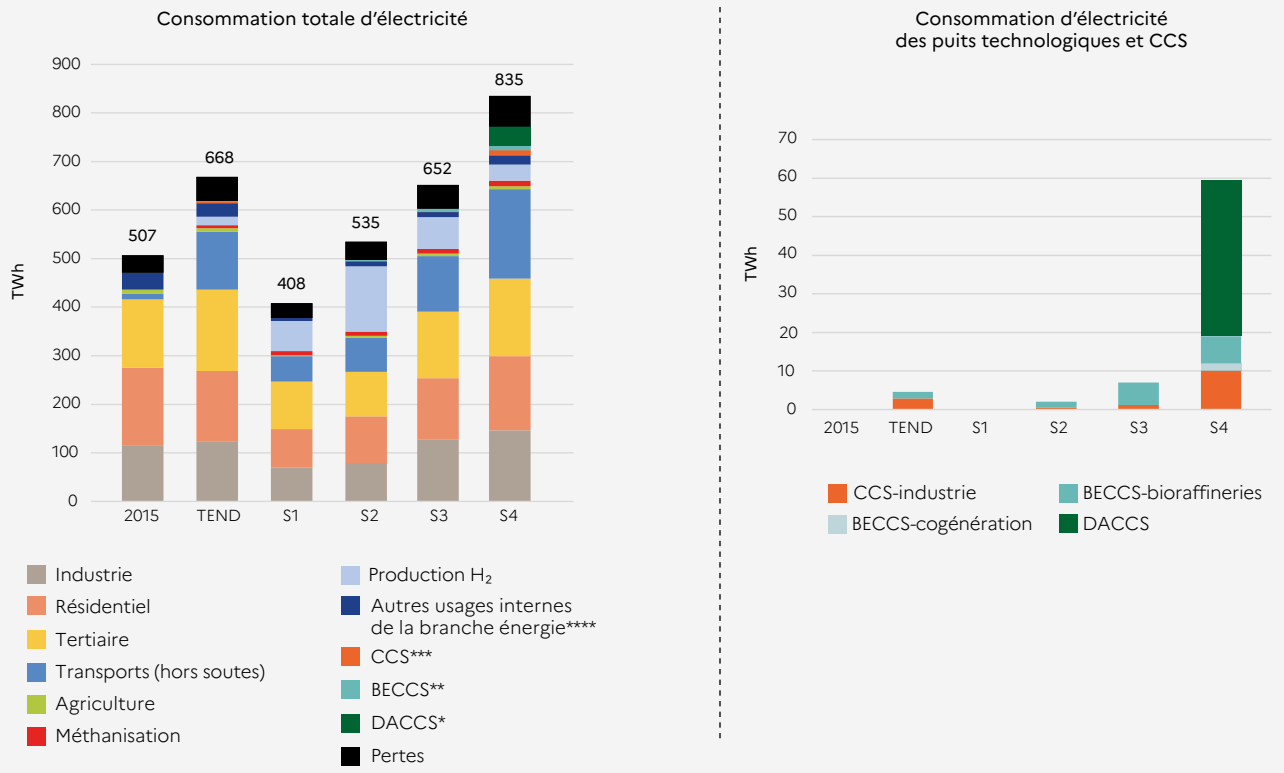
consommation de chaleur distribuée *via* les réseaux urbains est plus contrastée. Cette consommation reste proche du niveau actuel dans S1, alors qu'elle augmente avec la demande dans les autres scénarios, en particulier dans S3 (+ 67 % en 2050 par rapport à 2015)[2]. Mais comme la consommation finale totale d'énergie baisse dans tous les scénarios, la part de la chaleur issue des réseaux augmente (2,1 % en 2015, 2,7 % à 3,5 % en 2030, 3,5 % à 6 % en 2050) ; cette part augmente plus dans S2 et S3 car, dans ces deux scénarios, la baisse de la consommation finale est plus forte que dans S4 et la production de chaleur de réseau est plus importante que dans S1.

Ainsi, **dans tous les scénarios, le bouquet énergétique en 2050 est plus diversifié qu'aujourd'hui. Cependant les mix énergétiques obtenus diffèrent relativement peu.** Cela s'explique par l'existence de contraintes physiques et techniques, sur les ressources (notamment la biomasse) et sur les usages, par exemple l'usage exclusif à moyen terme de biocarburants pour l'aviation. Même s'il reste des incertitudes sur l'ampleur des marges de manœuvre disponibles, l'existence de ces contraintes et le besoin de diversification énergétique et de pilotage qu'elles impliquent sont des traits communs aux quatre scénarios.

2.3. Les contributions majeures de l'électricité et du gaz renouvelable à la décarbonation des systèmes énergétiques

Dans tous les scénarios, l'électricité devient le vecteur énergétique principal compte tenu de sa capacité à décarboner les usages. En 2050, la consommation totale d'électricité augmente par rapport à 2015 dans tous les scénarios sauf dans S1 *(Graphique 3)*. Elle croît de S2 à S4 en raison d'une part de l'augmentation des demandes directes (industrie, bâtiment, transports…) et indirectes (production d'hydrogène notamment) et d'autre part, dans S4, de la nécessité de mettre en place des puits technologiques et des procédés de captage et de stockage du carbone importants (BECCS, DACCS et CCS), eux-mêmes très énergivores. Ainsi, S4, qui s'approche de la neutralité carbone en donnant une place importante aux technologies de séquestration du carbone, aboutit à des consommations annuelles d'électricité de près de 60 TWh à l'horizon 2050 pour faire fonctionner ces technologies, soit 8 % de la consommation d'électricité, contre 1 % dans S3.

Graphique 3 *Consommation totale d'électricité par la branche énergie, les secteurs, les puits technologiques et le CCS en 2050*



* DACCS : *direct air carbon capture and storage.*
** BECCS : *bioenergy with carbon capture and storage.*
*** CCS : *carbon capture and storage.*
**** Les autres usages internes de la branche énergie comprennent les consommations d'électricité pour l'enrichissement de l'uranium, l'autoconsommation des centrales thermiques et des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP).

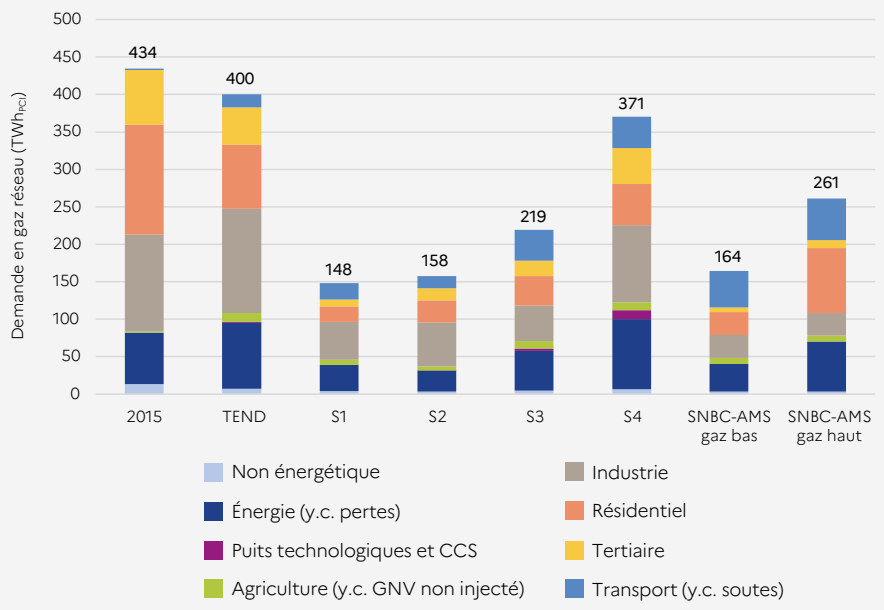
2 Cette hausse de 67 % en 2050 dans S3 par rapport à 2015 comprend également une hausse de chaleur en usage direct dans l'industrie (environ 14 TWh en 2050).

Le vecteur gaz conserve un talon d'utilisation d'au moins 148 TWh dans tous scénarios et semble ainsi constituer un vecteur indispensable à la transition malgré une baisse importante de sa consommation *(Graphique 4)*. Le gaz s'appuie en effet sur les infrastructures déjà en place aujourd'hui, notamment les réseaux de transport et de distribution qui desservent une grande partie du territoire et les infrastructures de stockage dont la capacité représente environ 120 TWh[3]. Dans les trois scénarios n'ayant pas un recours important aux puits technologiques (S1, S2 et S3), le vecteur de gaz voit son volume consommé divisé au moins par deux par rapport à 2015 (S3), voire par trois dans S1 et S2, portant sa consommation autour de 150 TWh en 2050 dans ces deux scénarios.

La répartition de la demande en gaz est radicalement modifiée par rapport à aujourd'hui : alors que le résidentiel et le tertiaire représentent en 2015 près de la moitié de la consommation de gaz, leur part n'est que de 20 % à 29 % en 2050 dans les quatre scénarios de neutralité carbone. En effet, la priorité est donnée aux usages peu substituables. Ainsi, les secteurs de l'industrie et de l'énergie (notamment pour assurer la flexibilité du système électrique) consomment environ 50 % du gaz nécessaire dans tous les scénarios. Les usages thermiques dans les bâtiments, plus substituables par d'autres sources d'énergie (bois, réseaux de chaleur et, en particulier, pompes à chaleur électriques), sollicitent moins le gaz. La forte baisse du niveau de demande en gaz, ainsi que sa forte décarbonation à l'horizon 2050, nécessitera une évolution des modalités de financement du réseau de gaz, indispensable pour la collecte de la production de biogaz et pour certains usages décentralisés.

Le vecteur hydrogène apparaît comme l'un des leviers de décarbonation des usages à l'horizon 2050, même si, en 2019, l'hydrogène est produit de manière carbonée (20,7 TWh) et que **son emploi est limité à certains usages industriels** (raffinage, engrais, chimie). Les besoins en hydrogène atteignent respectivement 55,2 TWh, 95,7 TWh, 93,9 TWh et 35,6 TWh de S1 à S4. L'hydrogène est tout d'abord mobilisé en complément de la méthanisation pour décarboner le gaz circulant dans les réseaux, par injection de méthane de synthèse (*power-to-methane*, dans S1, S2 et S3). Le secteur des transports lourds tire également les besoins en hydrogène, que ce soit en usage direct (utilisation d'hydrogène comme carburant) ou indirect (production de carburants liquides de synthèse) dans S2, S3 et S4. Enfin, les besoins industriels varient selon les scénarios. Certains nouveaux usages (sidérurgie, précurseur de plastique) sont fortement consommateurs d'hydrogène dans S2 et S3. Dans tous les scénarios, la technologie d'électrolyse émerge pour produire de l'hydrogène bas carbone et renouvelable à partir d'électricité *(Graphique 3)* : le vaporeformage de gaz reste mobilisé uniquement dans S1 (où le gaz est fortement décarboné) et S4 (recours au CCS). En 2050, l'électrolyse est la seule technologie de production d'hydrogène mobilisée dans S2 et S3. Par ailleurs, S3 est le seul scénario où émergent de grands consommateurs industriels centralisés, ce qui nécessite des infrastructures de transport et de stockage d'hydrogène d'une part et de l'importation d'hydrogène d'autre part (48 TWh).

Graphique 4 *Consommations totales de gaz par la branche énergie, les secteurs, les puits technologiques et le CCS en 2050*



3 Dans ce document, l'ensemble des données en TWh pour le gaz sont des TWh$_{PCI}$.

3. Trajectoires 2030-2050 de décarbonation des énergies

L'ensemble des scénarios suppose une suppression des énergies fossiles en usage direct (produits pétroliers) et leur remplacement, en grande majorité, par des énergies en usage direct et des énergies de réseau (gaz, chaleur et électricité) qui doivent être produites à partir de différentes sources décarbonées, en majorité renouvelables.

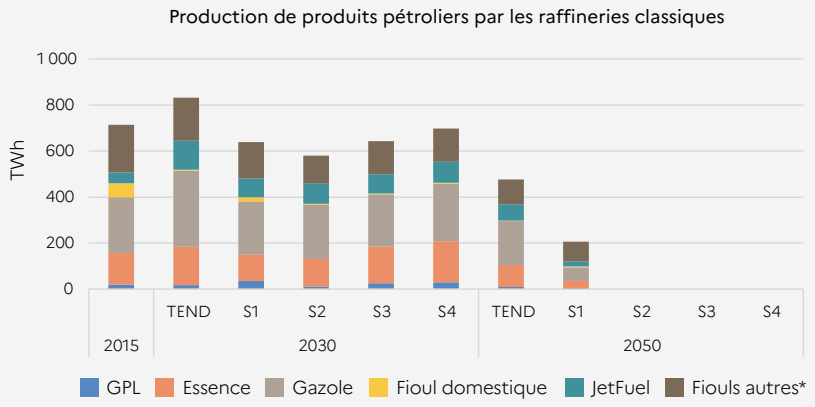
3.1. Une baisse progressive de l'activité des raffineries et la mise en place d'une filière de production de biocarburants

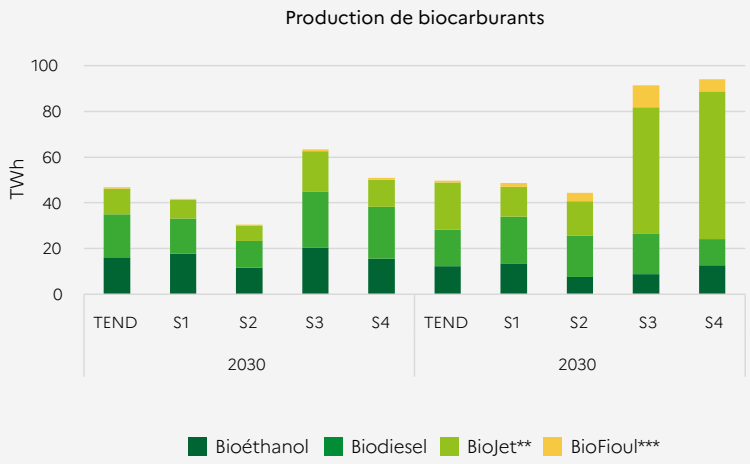
La restructuration des filières pétrolières devra être approfondie avec les spécialistes et les acteurs de ces filières. Dans tous les scénarios, l'activité des raffineries est réduite *(Graphique 5)*, jusqu'à la disparition complète de la production de produits pétroliers raffinés en France dans S2, S3 et S4 en 2050.

L'activité des raffineries se restructure autour d'une production limitée de biocarburants et de produits biosourcés pour la chimie (comme le bionaphta) à partir de ressources agricoles (comme les oléagineux). Cette production de biocarburants conventionnels est majoritaire dans S1 avec toutefois un niveau de production restreint. Les filières de biocarburants avancés sont largement déployées dans S3 et S4 grâce à une plus forte disponibilité de biomasses lignocellulosiques (cultures lignocellulosiques, résidus des filières agricole et sylvicole, bois...). C'est également le cas pour S2 avec cependant une production limitée de biocarburants avancés en raison de la faible disponibilité de biomasses lignocellulosiques.

Le développement des technologies de production de biocarburants est fortement dépendant de la disponibilité des ressources en biomasse, qui varie en fonction des scénarios (la disponibilité de biomasses lignocellulosiques est plus grande dans S3 et S4). Les éléctrocarburants ont donc été considérés pour compléter l'offre de biocarburants, puisque celle-ci ne permet pas de couvrir la demande des transports. En effet, malgré la réduction drastique de l'usage de carburants liquides grâce au le report modal et au recours au gaz et à l'électricité (- 73 % et - 86 % selon les scénarios par rapport à aujourd'hui), la demande en carburants liquides persiste sur les usages difficiles à substituer. C'est notamment le cas dans le transport aérien, maritime et fluvial. Cette contrainte d'offre résulte des limites physiques de la biomasse et de l'électricité mobilisable pour la production de biocarburants et d'éléctrocarburants. Elle montre également l'enjeu de la mobilisation et de l'optimisation de toutes les filières de production de biocarburants liquides et d'éléctrocarburants pour contribuer à l'objectif de neutralité carbone. En particulier, l'enjeu d'une production de biocarburants qui s'appuie sur des ressources en biomasse variées afin de limiter la pression sur les écosystèmes et préserver le puits biologique de carbone.

Graphique 5 *Évolution de la production des raffineries aux horizons 2030 et 2050*





* Fiouls autres : sont inclus notamment le fioul lourd (usage énergétique de l'industrie) et le naphta (nécessaire au vapocraquage en amont de la chaîne de plasturgie) utilisés dans les usages non énergétiques de l'industrie.
** BioJet : biocarburant substitut du kérozène et du jet fioul, pour l'aviation.
*** BioFioul : biodiesel substitut du fioul lourd, pour le transport maritime.

3.2. L'enjeu majeur de l'évolution rapide et du pilotage d'ensemble des systèmes d'énergie de réseau (électricité, gaz, chaleur)

Les scénarios envisagent des mix électriques différents pour prendre en compte deux principaux facteurs : des niveaux de demande d'électricité contrastés d'une part et des logiques différentes d'aménagement du territoire, d'implication de la population ou de gouvernance publique sous-jacentes aux quatre scénarios d'autre part[4]. Ainsi, S1 et S2 reposent davantage sur une logique de production décentralisée visant des rendements d'échelle moindres, tandis que S3 et S4 sont des scénarios dans lesquels le rôle fort de l'État permet le déploiement industriel et massif de technologies moins déployées à ce jour, telles que les EPR ou les parcs d'éolien flottant. Tous les scénarios reposent sur un mix électrique basé à plus de 75 %[5] sur les renouvelables en 2050. Ils comportent également une part de nucléaire historique de base en 2050. L'analyse du mix électrique fait l'objet d'une validation de l'équilibre offre-demande au pas de temps horaire. La modélisation considère plusieurs scénarios de météo. Elle prend en compte l'évolution des interconnexions avec les pays voisins et le développement différencié de la flexibilité de la demande dans les quatre scénarios. L'ADEME est en train de consolider ses résultats de modélisation avec les travaux effectués par RTE dans le cadre de son exercice de prospective 2050. L'analyse détaillée des mix électriques fera l'objet d'une publication en 2022.

Le potentiel de développement des différentes filières de production de gaz renouvelable à 2050 est très important par rapport à aujourd'hui. En tenant compte des arbitrages avec les autres besoins sur la ressource primaire, le niveau de production de gaz décarboné varie entre 130 TWh et 185 TWh en 2050. Ces faibles volumes comparés à la consommation actuelle de gaz (de - 30 % à - 43 % selon les scénarios) traduisent les limites des ressources disponibles pour la production de gaz décarboné. La méthanisation pour production de biométhane est le pilier de la décarbonation du gaz, quel que soit le scénario. Il s'agit en effet de la seule voie actuellement mature de production de gaz renouvelable, dont le déploiement est déjà amorcé et qui présente un potentiel important. L'injection de biométhane dans le réseau en 2050 atteint de 92 TWh à 126 TWh selon les scénarios. La deuxième voie de décarbonation du gaz repose sur le couplage de la méthanisation avec le *power-to-methane*. Ce fonctionnement en duo permet de valoriser le CO_2 biogénique émis par la méthanisation et donc d'augmenter le productible de gaz à partir de la même ressource en biomasse. La pyrogazéification peut être une voie complémentaire de décarbonation du gaz. Dans S1, la tension sur la ressource est trop forte pour que la filière pyrogazéification puisse apparaître et celle-ci ne se développe qu'à la marge dans S2. Elle tient un rôle important dans S3, où la production sylvicole est plus intensive, la politique de gestion des déchets est davantage tournée vers la production d'énergie et les besoins en combustion sont moins importants. Le gaz naturel importé, même en faible proportion, dans S1, S2 et S3 génère des émissions qu'il est nécessaire de compenser. Dans S1 et S2, le plus faible recours à la biomasse, la forte réduction de l'artificialisation des sols et le développement de pratiques agricoles « stockantes » permettent de disposer de puits naturels à même de compenser ces émissions. Dans S3 et S4, la réduction des émissions de GES du gaz passe aussi par le CCS déployé sur les sites industriels de tout le territoire. Dans S4, le recours aux importations de gaz naturel est nécessaire pour couvrir 46 % de la consommation, ce qui induit des émissions importantes et le recours massif à des puits technologiques en plus du CCS. Ce scénario suppose également des importations de gaz décarboné ou renouvelable.

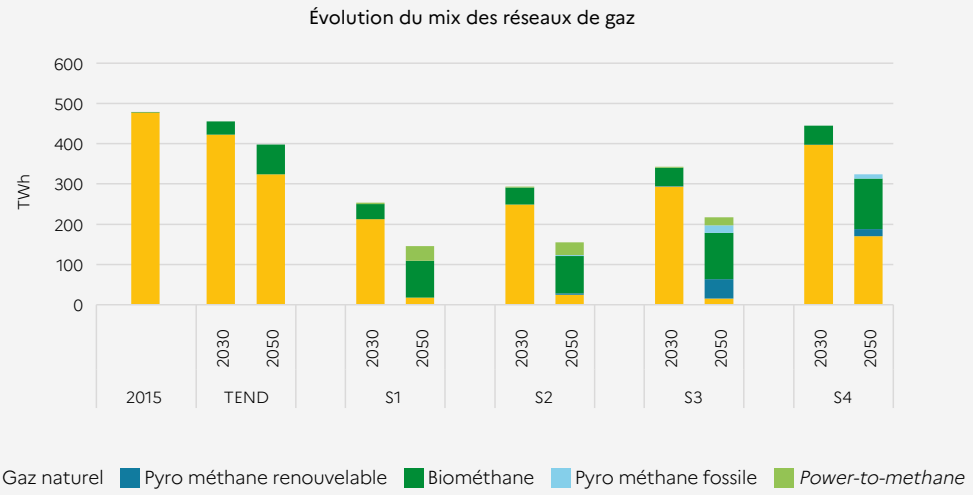
Dans tous les scénarios, la part de la chaleur qui est injectée dans les réseaux s'accroît. Alors que la chaleur injectée représentait 3 % de la chaleur totale en 2015, elle représente 6 % dans S4 en 2050, 8 % dans S1, et 10 % dans S2 et S3. Les travaux d'amélioration de l'efficacité énergétique dans les secteurs résidentiel et tertiaire sont associés à un raccordement plus important aux réseaux de chaleur, ce qui permet d'accroître les volumes de chaleur distribuée par les réseaux malgré une demande totale de chaleur divisée par deux. Ainsi, en 2050, 31 à 61 TWh de chaleur sont délivrés selon les scénarios, contre 27 TWh en 2015 *(Graphique 6)*. L'usage des énergies fossiles pour produire cette chaleur de réseau diminue également dans tous les scénarios : les EnR&R (biomasse, UIOM, géothermie, chaleur fatale, biogaz, solaire thermique) connaissent une augmentation très importante, passant de 50 % en 2015 à 90 % dans S1, S2 et S3 (et 88 % dans S4). Le gaz qui est utilisé en appoint est, comme nous l'avons vu, décarboné à plus de 80 % dans S1, S2 et S3 en 2050.

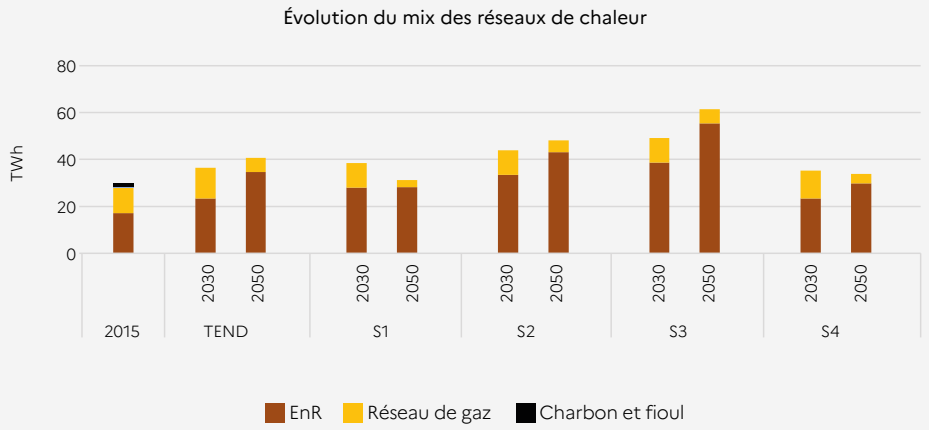
4 Beaucoup d'hypothèses jouent sur le taux et la vitesse de déploiement des capacités de production d'énergie renouvelable : en particulier, les zones adaptées et les surfaces disponibles, le niveau d'acceptabilité des populations locales, la faisabilité technique ainsi que le temps de processus administratif et de réalisation des projets.

5 En prenant en compte le taux d'EnR du réseau de gaz pour les centrales à gaz utilisées comme solution de flexibilité.

En dépit des différences sectorielles importantes des transformations réalisées dans chaque scénario, la diversification des mix de production énergétique nationale est un enjeu commun[6]. En effet, les quatre scénarios reposent tous sur le développement massif des énergies renouvelables (électriques et biomasse), ainsi que sur la diversification et l'augmentation de la valorisation de la biomasse non forestière. À titre d'exemple, tous les scénarios nécessitent une augmentation des capacités de production de biométhane de plus de 3 TWh/an et une très forte croissance des capacités EnR électriques (+ 5,5 à + 8,9 GW/an en moyenne sur la période 2020-2050 selon les scénarios).

Graphique 6 *Trajectoires de décarbonation de la production des énergies de réseau*





Périmètre : quantité d'énergie injectée dans les réseaux, ne comprend pas le gaz ou la chaleur en usage direct. L'évolution du mix de production d'électricité sera présentée dans la publication complémentaire sur le système électrique.

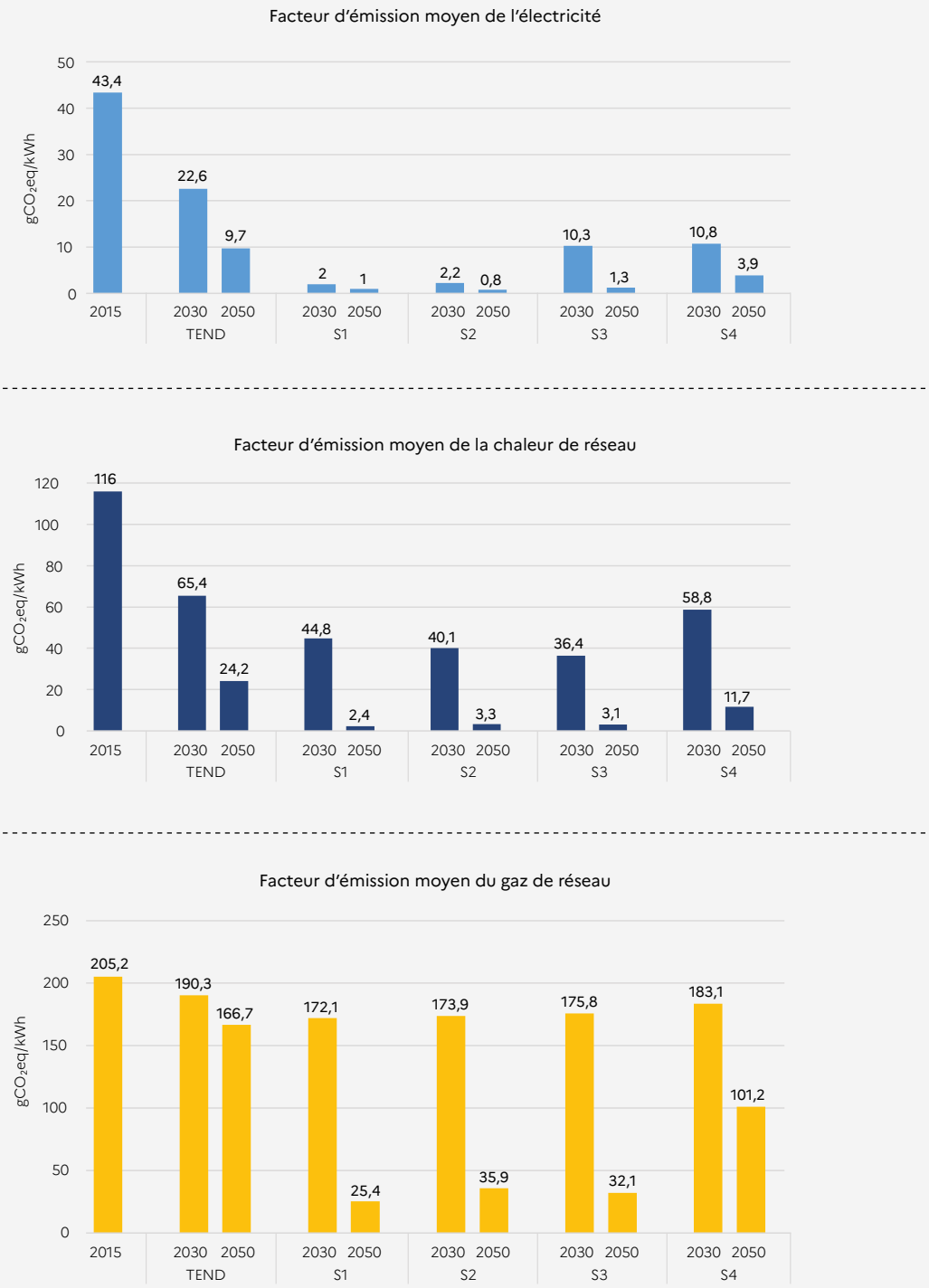
6 L'évolution du mix électrique des scénarios sera présentée dans la publication spécifique sur les systèmes électriques.

Néanmoins, **cette similarité cache des transformations d'ampleur et de nature très différentes. Les chapitres sectoriels précédents ont souligné l'existence de nombreux arbitrages particuliers et plusieurs trajectoires de transformation alternatives possibles dans tous les domaines.** Les différences importantes de niveau de demande impliquent un nombre d'installations de capacités de production et des investissements à réaliser également très différents. Les contraintes d'usages dans les transports, le bâtiment, l'industrie et l'agriculture, ainsi que les limites de gisements ou le contexte plus général de chaque scénario, conduisent à des mix énergétiques qui se différencient selon les facteurs clés suivants :

- un recours plus ou moins important à la **biomasse forestière** pour l'énergie et à la combustion de biomasse, qui est plus marqué dans S1 et S2 ;
- un développement plus marqué des **biocarburants** dans S3 et S4 ;
- un développement plus marqué des **réseaux de chaleur et de la pyrogazéification** dans S3 ;
- un développement des **technologies nucléaires EPR** uniquement dans S3 et S4 ;
- un développement de l'**éolien en mer flottant** faible dans S1 et S2 et plus fort dans S3 et S4 ;
- un recours plus important à des **importations de gaz** dans S4 et à l'importation d'une partie de l'hydrogène et de la biomasse nécessaire à l'industrie dans S3.

Au total, **ces transformations rapides et à grande échelle des systèmes de production d'énergie de réseaux aboutissent à une réduction importante du contenu en CO_2 de l'énergie produite et consommée** *(Graphique 7)*. La tendance à la baisse du facteur d'émission du kilowattheure d'électricité est accélérée dans tous les scénarios. Cette baisse est plus importante aux horizons 2030 et 2050 pour les scénarios qui présentent des besoins énergétiques moins importants (S1 et S2), en raison d'un moindre recours au gaz que dans S3 et S4 pour produire de l'électricité et pour assurer la flexibilité du système électrique. Le gaz naturel est mobilisé comme une énergie de transition, ce qui explique des facteurs d'émission qui restent élevés d'ici à 2030. Ces derniers baissent fortement à l'horizon 2050 par le développement de la production de biométhane et de méthane de synthèse, tandis que la décarbonation des réseaux de chaleur est accélérée dans tous les scénarios. Les ressources en biomasse disponibles pour produire de la chaleur et du gaz deviennent limitantes dans les scénarios où les besoins énergétiques sont élevés (S3 et S4).

Graphique 7 *Évolution du contenu en GES moyen du kWh d'énergie de réseaux*



Le facteur d'émission moyen est calculé à partir des facteurs d'émission du CITEPA appliqués aux quantités d'énergies utilisées, en ajoutant 1% pour tenir compte du CH_4 et du N_2O dégagés lors de la combustion.

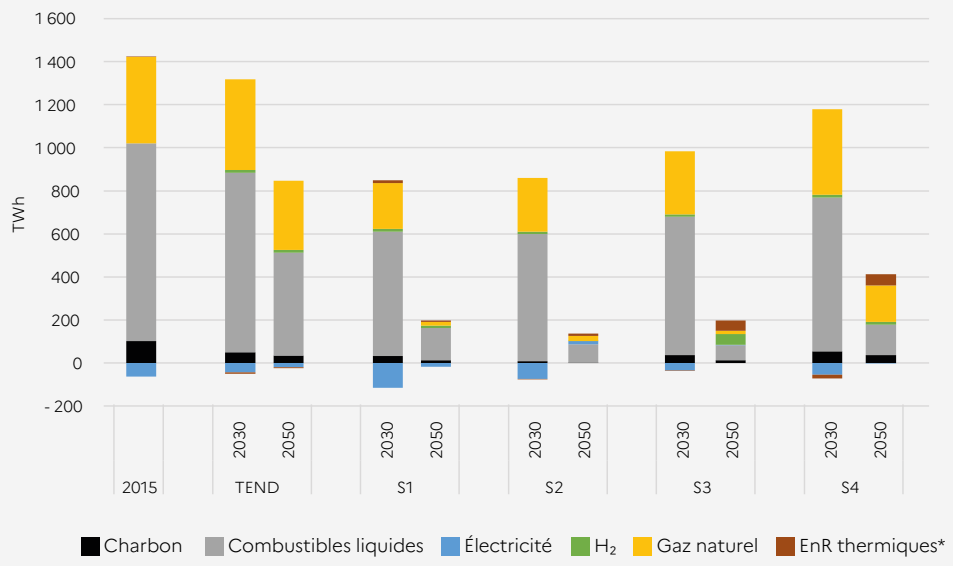
3.3. Le développement d'une indépendance vis-à-vis des énergies fossiles, mais une sécurité énergétique à reconstruire

Les quatre scénarios de neutralité carbone ont été construits de façon à exploiter au maximum les potentiels de production d'énergie renouvelable en France, sans envisager différents scénarios d'échange d'énergie et de relations géopolitiques avec le reste du monde. Néanmoins, les résultats obtenus soulignent l'importance des mutations des relations commerciales et des enjeux de sécurité énergétique.

Quel que soit le scénario de transition énergétique retenu, les échanges d'énergie avec l'étranger devront fortement évoluer puisque les énergies fossiles (charbon, gaz et pétrole) sont aujourd'hui quasiment intégralement importées *(Graphique 8)*. En volume, les importations de sources fossiles représentaient 1 460 TWh en 2015. Leur substitution par des sources décarbonées s'accompagnera donc d'une forte diminution de ces importations, ce qui aura des implications sur la balance commerciale française et la sécurité énergétique. Dès 2030, elles doivent baisser de 20 % dans S4 jusqu'à 44 % dans S1 pour atteindre des niveaux faibles correspondant aux usages stratégiques résiduels en 2050 (- 76 % dans S4 à - 94 % dans S2). À moyen terme (2030), les exportations d'électricité offrent des débouchés pour la production excédentaire, que ce soit la production nucléaire ou renouvelable, lorsqu'elle surpasse la demande domestique. Tandis qu'à plus long terme (2050) le parc de production devient moins excédentaire et les capacités de stockage se développent, ce qui réduit les échanges extérieurs. En revanche, à cet horizon, c'est l'importation de biomasse, de gaz et de biocarburants qui devient stratégique pour la sécurité énergétique. Toutefois, les scénarios n'étudient pas les incertitudes sur l'exploitation annuelle du potentiel français d'approvisionnement en biomasses. Les importations de biomasses restent donc modestes (5 à 50 TWh, entre S1 et S4), bien qu'elles soient plus importantes dans les scénarios où la demande énergétique est supérieure (S3 et S4). L'incertitude sur l'évolution des systèmes agricoles et forestiers, les conditions climatiques et donc l'approvisionnement en ressources biomasses sur le territoire français, nécessitera des options d'importation pour assurer la sécurité énergétique.

Les analyses macroéconomiques des scénarios qui seront publiées en 2022 évalueront les effets sur l'économie française de l'évolution de la balance commerciale. **Notons que ces résultats ne soulignent pas que la France peut être autonome énergétiquement, puisqu'ils n'intègrent pas une analyse des incertitudes sur l'approvisionnement français et la demande d'énergie décarbonée.** Une telle analyse sera nécessaire pour préciser les stratégies de sécurité énergétique possibles de la France. Elle devra aussi prendre en compte une estimation des capacités de production étrangère et des potentiels d'échanges commerciaux avec des partenaires fiables.

Graphique 8 Évolution des échanges extérieurs d'énergie selon les scénarios aux horizons 2030 et 2050



* Les EnR thermiques importées comprennent la biomasse solide, le biogaz et les biocarburants.
Note de lecture : lorsque les importations surpassent les exportations annuelles pour une catégorie d'énergie, les importations nettes sont représentées dans la partie positive du graphique et inversement pour les exportations nettes (par exemple, la France est exportatrice nette d'électricité, ce qui est représenté en négatif).
Par convention, les importations d'uranium nécessaire à la production d'électricité ne sont pas représentées.

4. Agriculture, forêt, espaces naturels et usages de la biomasse : clés de voûte de la transition écologique

Les scénarios étudiés confirment le rôle stratégique de la protection des écosystèmes, de l'alimentation et de la bioéconomie en général dans l'objectif de neutralité carbone de la France.

Au-delà de l'enjeu clé pour la survie de l'humanité que représente la préservation de la biodiversité et des écosystèmes, le monde du vivant combine en effet trois grands leviers de lutte contre le changement climatique :

- **un potentiel de réduction des émissions de GES** de l'agriculture par une évolution de l'offre alimentaire et des systèmes productifs ;
- **un réservoir majeur de carbone** à préserver par le maintien des stocks et puits existants au travers de la préservation des écosystèmes et le développement des pratiques stockantes pour générer un stockage additionnel dans les sols et les forêts ;
- **un potentiel de production de ressources substituables aux ressources fossiles** autant pour un usage énergétique que non énergétique comme dans les matériaux de construction.

L'analyse d'ensemble des scénarios montre l'importance d'évaluer conjointement les leviers basés sur le vivant, car ils sont intimement connectés. Par exemple, une action d'augmentation des prélèvements et de l'utilisation de la biomasse en substitution des ressources fossiles a un effet direct sur les dynamiques de stockage de carbone dans les écosystèmes ou sur les émissions de GES du secteur agricole. En outre, comme ces leviers reposent sur le vivant, ils sont particulièrement sensibles et vulnérables aux aléas climatiques, ce qui peut fortement conditionner le succès des différentes stratégies envisagées dans les quatre scénarios.

Favoriser la résilience des écosystèmes et l'adaptation des systèmes de production agricoles et forestiers à l'évolution du climat est un enjeu prioritaire pour une stratégie robuste, pour éviter l'effondrement des écosystèmes, de leur capacité de production, et pour maintenir les puits de carbone.

Les évolutions imaginées dans chacun des scénarios sont détaillées dans les chapitres *2.2.1. Production agricole* et *2.2.2. Production forestière*. Les principaux leviers structurants de transformation sont l'évolution des régimes alimentaires, l'orientation des systèmes agricoles (notamment le niveau d'intensification), l'évolution des cheptels, la répartition de l'usage des sols (assolement, artificialisation, boisement), le niveau de prélèvement des biomasses agricoles et forestières (niveau d'intensification de la sylviculture), l'articulation des usages possibles de la biomasse entre les usages alimentaires et non alimentaires, les filières énergétiques (chaleur, biogaz, biocarburants, électricité) et non énergétiques (chimie et matériaux biosourcés).

Nous proposons donc ici une vision synthétique des résultats obtenus pour l'usage des terres, les ressources et usages de la biomasse, les potentiels de réduction des émissions de GES d'origine agricole et de stockage de carbone.

4.1. Usage des terres

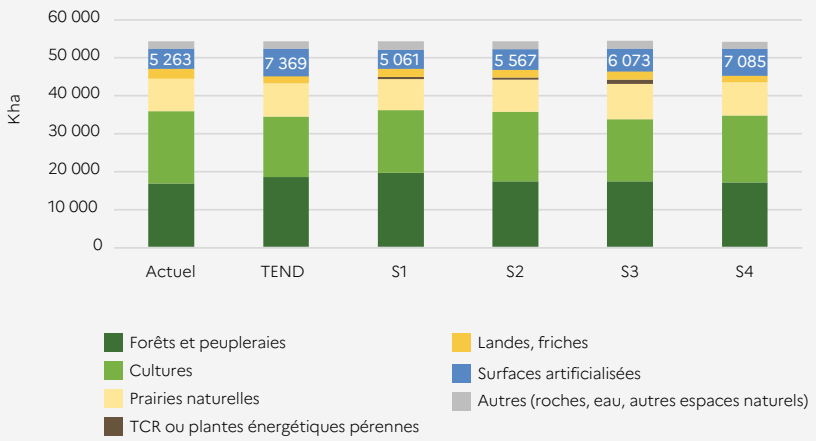
L'évolution de la répartition des quelque 55 millions d'hectares métropolitain est représentée sur le *Graphique 9*. **Les surfaces artificialisées sont systématiquement réduites par rapport au scénario tendanciel**[7].

Dans les trois premiers scénarios, les principes de l'agroécologie sont mis en avant, tandis que S4 et le tendanciel voient se maintenir, voire s'accentuer, les modèles productifs actuels. L'évolution de la surface agricole utile est détaillée dans le chapitre *2.2.1. Production agricole*. Elle varie entre 24,6 Mha et 26,7 Mha, avec la valeur la plus élevée dans S2 et la plus faible

7 Les données d'artificialisation représentées ici sont provisoires et basées sur des hypothèses de travail réalisées dans le cadre des simulations du secteur agricole. Ces données seront affinées dans le cadre d'un travail réalisé par le CGDD et feront l'objet d'une publication spécifique en 2022.

dans S1 (où un développement forestier important est permis par l'évolution des régimes alimentaires). La surface de prairie est maintenue (de 8,1 à 9,3 Mha), grâce à l'évolution de la demande alimentaire et des types d'élevage. Pour répondre à la demande en bioénergies, S1, S2 et S3 supposent par ailleurs la mise en place de cultures énergétiques pérennes, comme par exemple les taillis à courtes et très courtes rotations (entre 0,5 et 1 Mha). L'analyse de l'évolution de l'usage des terres sera approfondie dans une publication spécifique en 2022.

Graphique 9 Usage des terres dans les différents sénarios à l'horizon 2050



TCR : taillis courte rotation.

4.2. Ressources et usages des biomasses

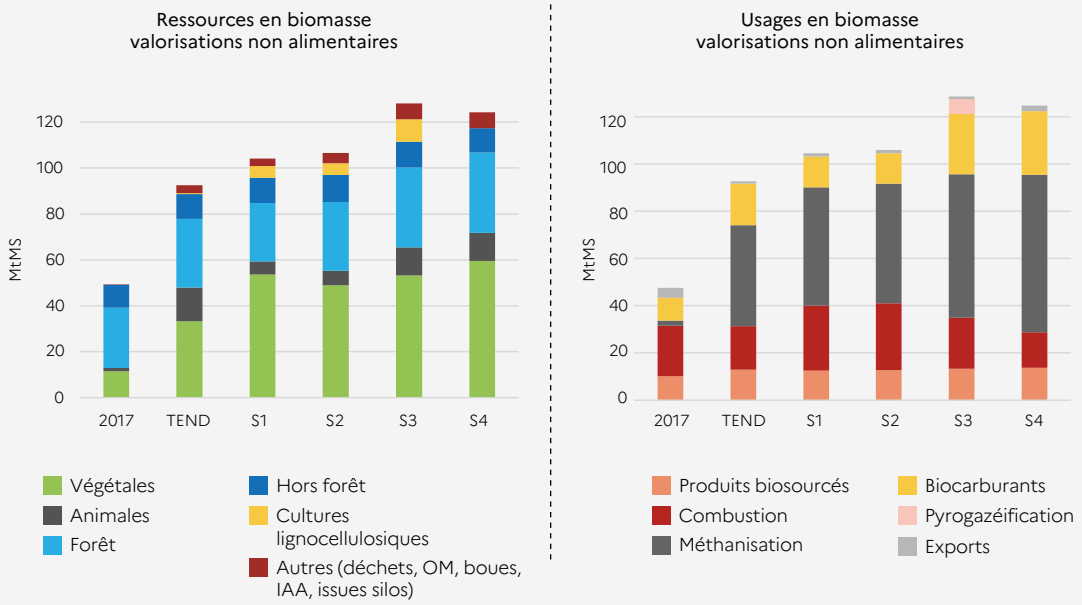
Pour l'ensemble des scénarios, la production nationale de biomasse pour des usages autres qu'alimentaires (produits biosourcés, énergétiques) est environ deux fois supérieure à celle de 2017, ce qui est un enjeu considérable pour les secteurs agricoles et forestiers *(Graphique 10)*. Le volume de biomasse mobilisée dépasse les 100 millions de tonnes de matière sèche (MtMS) et fait de cette ressource un « pilier » indispensable à l'ensemble des stratégies. Les scénarios se différencient par le volume total de biomasse mobilisée, la répartition entre les ressources (forestières, cultures végétales, effluents…) et les usages priorisés. Par exemple, dans S1 et S2 la biomasse additionnelle provient en grande partie des biomasses d'origine agricole : cultures intermédiaires, résidus de culture (pailles) et surplus de prairies, qui sont mobilisés et valorisés pour les usages non alimentaires. Par ailleurs, dans ces deux scénarios, les niveaux de prélèvement de bois en forêt sont limités pour privilégier le stockage de carbone dans les écosystèmes. *A contrario*, S3 et S4 ont les plus hauts niveaux de mobilisation de la biomasse (augmentation des niveaux de prélèvement de bois en forêt notamment) pour maximiser les effets de substitution aux ressources fossiles et le stockage du carbone dans les produits plutôt que sur pied. Néanmoins, ce dernier levier demeure limité en raison du flux de biomasses orienté vers la valorisation énergétique. S3 intègre par exemple l'option d'un développement important de cultures lignocellulosiques pour répondre à la demande en bioénergies.

Le recours à la biomasse (agricole, forestière…) pour produire des matériaux augmentent d'environ 20 % en tonnage dans tous les scénarios, avec une forte différenciation des usages d'un scénario à l'autre. Par exemple, pour S1 et S2, une part plus élevée de la récolte de bois permet de maintenir une production plus importante de produits de sciage et de panneaux.

Convertie en énergie, cette biomasse contribue au mix énergétique dans des proportions significatives, de l'ordre de 290 TWh dans S1 à plus de 380 TWh dans S3. **En se basant sur l'ensemble des consommations intérieures brutes (énergie primaire), on peut estimer que le vivant contribue à hauteur de 16,9 % (dans S4) à 31 % (dans S1) au mix énergétique global en fonction des scénarios en 2050, contre 5,1 % aujourd'hui**[8], ce qui confirme son rôle stratégique et incontournable dans la transition énergétique du pays.

8 Chiffres de 2017 : la consommation réelle primaire totale en métropole était de 2 861 TWh, tandis que la consommation de biomasse pour des usages énergétiques était de 147 TWh (en énergie primaire).

Graphique 10 *Ressources et usages non alimentaires de la biomasse en millions de tonnes de matière sèche*



Légende de gauche : végétales : cultures intermédiaires, résidus de culture, surplus prairies ; animales : effluents d'élevage ; hors forêt : bois ; cultures lignocellulosiques : taillis à courte rotation, miscanthus ; autres : déchets (bois, industries), ordures ménagères (biodéchets), coproduits et sous-produits des industries agroalimentaires.

Légende de droite : produits biosourcés : usages non énergétiques et non alimentaires de la biomasse (ex. : matériaux de construction).

Par ailleurs, ce rôle souligne de façon claire l'importance de soutenir l'adaptation des écosystèmes face au changement climatique pour garantir une meilleure disponibilité de ces gisements dans le temps. L'utilisation de cette énergie est différente selon les scénarios : la combustion reste majoritaire dans S1 et S2, tandis que la méthanisation et les biocarburants deviennent les usages privilégiés dans S3 et S4. Quel que soit le scénario considéré, la méthanisation, aujourd'hui encore peu développée, est un « pilier » des usages de la biomasse envisagés pour les années à venir.

4.3. Potentiels de réduction des émissions et de stockage additionnel

Les différents secteurs de l'agriculture représentent 20 % des émissions de GES au niveau national. Ces émissions d'origine essentiellement non énergétique viennent des cycles naturels du carbone et de l'azote mais sont également liées aux activités anthropiques. Leur réduction rencontre des limites. Par exemple, **dans le domaine agricole, le potentiel d'abattement des émissions GES selon les scénarios s'inscrit dans une fourchette de 30 à 56 MtCO₂eq** par rapport à aujourd'hui. L'atteinte du facteur 2[9] n'est possible que dans S1 et S2. Dans ces deux scénarios, cela est rendu possible par une évolution des régimes alimentaires de la population, le développement des pratiques agroécologiques, ainsi qu'un retour à davantage de saisonnalité dans la production des denrées alimentaires (réduction importante des cultures sous serres chauffées). Dans S3 et S4, au contraire, l'évolution du secteur se distingue par le développement de systèmes plus productifs en tonnes de biomasses produites et par un maintien plus important de l'élevage (dans une logique de consommation et d'exportation), y compris par rapport au tendanciel. Afin d'avoir une vision exhaustive du secteur, ce bilan serait à compléter par l'empreinte globale du secteur alimentaire qui représente de l'ordre d'un quart des émissions de GES des Français.

Au-delà de la production alimentaire et de la production de biomasse, l'agriculture et la forêt apportent d'autres services environnementaux essentiels à la société, par exemple comme réservoirs de biodiversité, contribution à la conservation des sols et de la qualité des eaux, services socio-culturels… Ce sont aussi les secteurs « gestionnaires » du stock de carbone de la biosphère les plus importants par

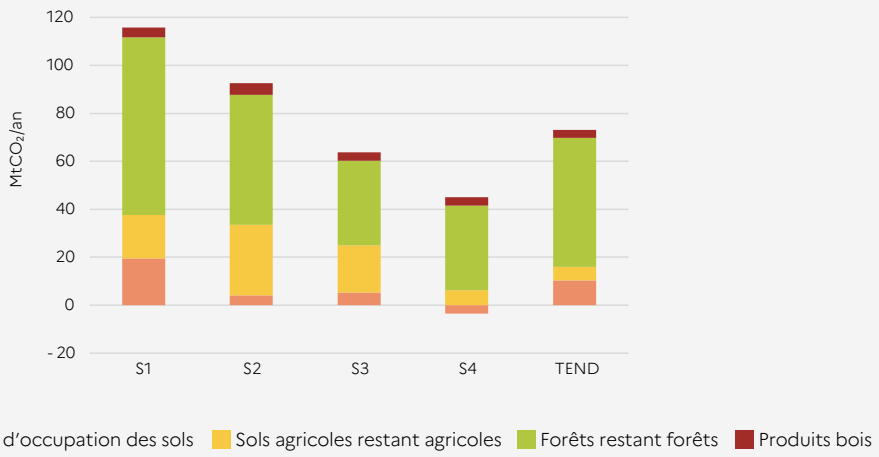
9 Dans la Stratégie Nationale Bas Carbone, c'est la division par deux des émissions de GES (ou facteur 2) par rapport au niveau de 1990 qui est visée pour le secteur agricole à l'horizon 2050 (soit - 46 % entre 2015 et 2050), en cohérence avec les objectifs européens et nationaux.

leur capacité de stockage de carbone dans les sols et les arbres. La comparaison des scénarios souligne **la grande variabilité des impacts sur les stocks et les puits actuels et sur le stockage additionnel à l'horizon 2050.** Cette variabilité des résultats s'explique principalement par trois groupes d'hypothèses sur :

- l'intensité de la récolte en forêts ;
- le développement de pratiques agricoles « stockantes », en particulier les couverts végétaux et l'agroforesterie intraparcellaire ;
- les évolutions de l'occupation des sols (maîtrise de l'artificialisation, etc.).

Dans le scénario tendanciel, les accrus forestiers continuent à augmenter aux dépens des surfaces cultivées. Le stockage du carbone dans la forêt augmente donc par rapport à aujourd'hui. Tandis que dans S3 et S4, les surfaces en cultures sont maintenues et les accrus forestiers sont plus réduits. Les puits de carbone au niveau des écosystèmes sont plus faibles dans S3 et S4, où le niveau de prélèvement de biomasse est plus important[10] *(Graphique 11)*. L'artificialisation des sols et l'intensification des récoltes de bois en forêt réduit les stocks et les puits forestiers actuels dans ces scénarios (de 18 et 22 $MtCO_2$/an en moins à l'horizon 2050). Le niveau de stockage additionnel par des pratiques agricoles, par le développement des boisements ou le maintien des gestions sylvicoles extensives est aussi très différent selon les scénarios (59 $MtCO_2$ dans S1 à 10 $MtCO_2$ dans S4). L'analyse montre par ailleurs que le puits dans les produits bois reste faible à l'horizon 2050. Il est maximal dans S2 (+ 4,8 $MtCO_2$/an). Le chapitre *2.4.3. Puits de carbone* présente une estimation du puits UTCATF[11] en 2030 et 2050, en comptabilisant la partie du bilan UTCATF lié à la gestion forestière par rapport à un niveau de référence (ici, le scénario tendanciel), comme le demande le règlement européen 2018/841[12].

Graphique 11 *Puits naturels de carbone en 2050 dans la biomasse et les sols*



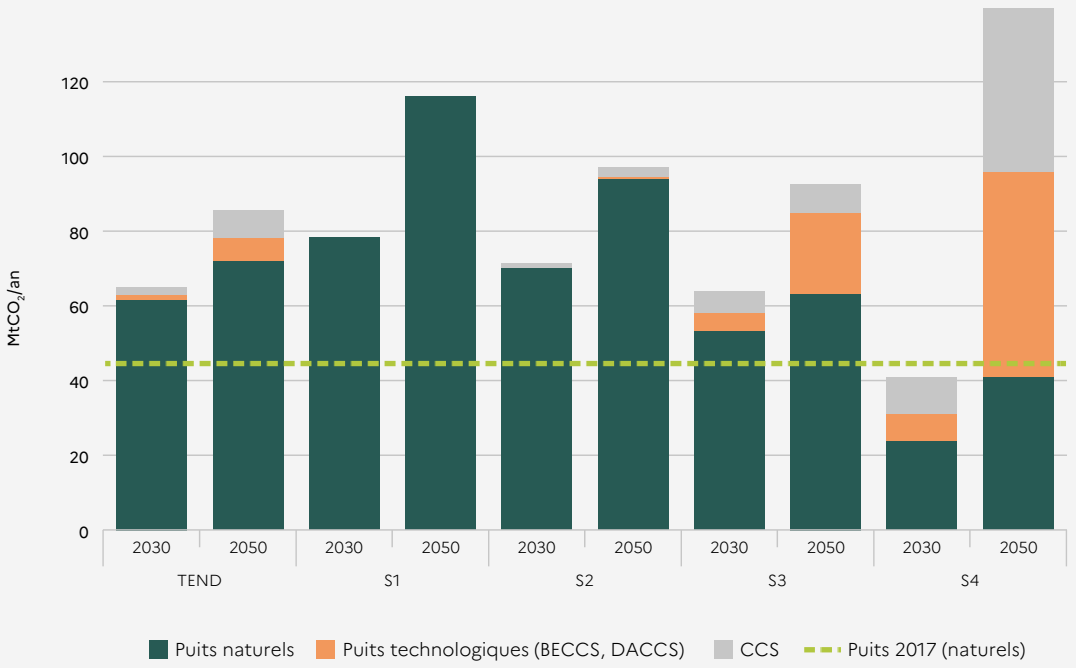
Note de lecture : le stockage dans les sols est considéré uniquement sur une profondeur de 0-30 cm.

10 L'effet de substitution est comptabilisé dans les secteurs utilisateurs de biomasse.
11 UTCATF : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie.
12 Règlement (UE) 2018/841 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 relatif à la prise en compte des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie dans le cadre d'action en matière de climat et d'énergie à l'horizon 2030, et modifiant le règlement (UE) n° 525/2013 et la décision (UE) n° 529/2013.

5. Bilan des puits naturels et technologiques

Au bilan, tous les scénarios montrent une augmentation des puits de carbone d'un facteur 2 à 3 par rapport à 2017 *(Graphique 12)*. Pour les deux premiers scénarios cette augmentation repose principalement sur les puits naturels tandis qu'elle repose majoritairement sur les puits technologiques et CCS dans S3 et S4 qui présentent des puits naturels inférieurs au tendanciel, et même inférieurs à 2017 pour S4.

Graphique 6 Bilan du CCS, des puits technologiques et naturels en 2030 et 2050



N. B. : la valeur du puits en 2017 est présentée comme référence sachant qu'elle n'a pas été calculée avec la même méthode que pour les scénarios mais à partir des valeurs de l'inventaire national réalisé par le CITEPA, en y ajoutant la séquestration de carbone dans les sols forestiers et le bois mort en forêt (*cf.* chapitre *2.4.3. Puits de carbone*, *section 4.3*).

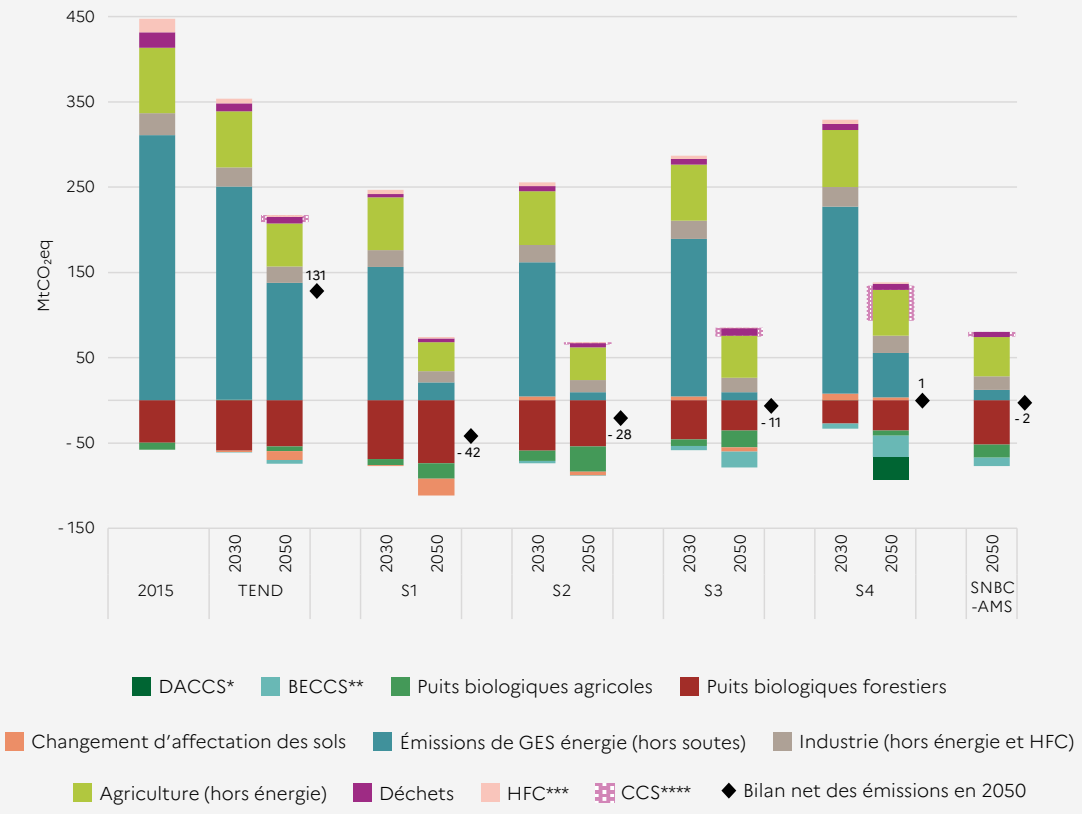
6. Émissions nettes de gaz à effet de serre et neutralité carbone

Le *Graphique 13* montre que **les quatre scénarios de neutralité carbone parviennent à la cible d'émissions nettes annuelles nulles en 2050 par une réduction drastique des émissions et en combinant plus ou moins les puits naturels et les puits technologiques.** La baisse des émissions et le développement des puits constituent des ruptures, dans tous les scénarios, par rapport à la prolongation des tendances historiques (scénario tendanciel). Tous les scénarios présentent également un talon d'émissions jusqu'en 2050, qui correspond à certains usages où la consommation d'énergie carbonée ne peut être évitée, mais surtout aux émissions des procédés industriels et aux cycles naturels du carbone et de l'azote modifiés par l'agriculture.

Les scénarios se distinguent par la composition et le niveau du talon d'émissions résiduelles en 2050, ainsi que par la composition et le niveau des sources de séquestration de GES. La moindre pression sur les terres et les ressources en biomasse dans S1 et S2 permet une plus grande contribution à l'absorption des puits biologiques (forestiers et agricoles), supérieure à 90 $MtCO_2$. En revanche, la plus grande exploitation des forêts et l'évolution des régimes alimentaires et agricoles dans S3 et S4 associées à une forte demande limitent la capacité des puits biologiques à respectivement - 64 et - 41 $MtCO_2$, ce qui rend nécessaire le développement de solutions technologiques de captage et de stockage géologique du CO_2 (*Graphique 13* et *Tableau 1*) :

- dans tous les scénarios sauf dans S1, *via* la réduction des émissions industrielles par des technologies de CCS (*carbon capture and storage*) ;
- dans S2, S3 et S4, *via* le recours à du CCS sur des unités fonctionnant à la biomasse (bioraffinerie ou cogénération bois), BECCS (*biomass energy CCS*) ;
- dans S4, par un recours à du CCS sur air ambiant (*direct air CCS* [DACCS]), en plus du BECCS et des autres solutions de CCS.

Graphique 13 *Bilan des émissions et du captage des GES en 2030 et 2050*



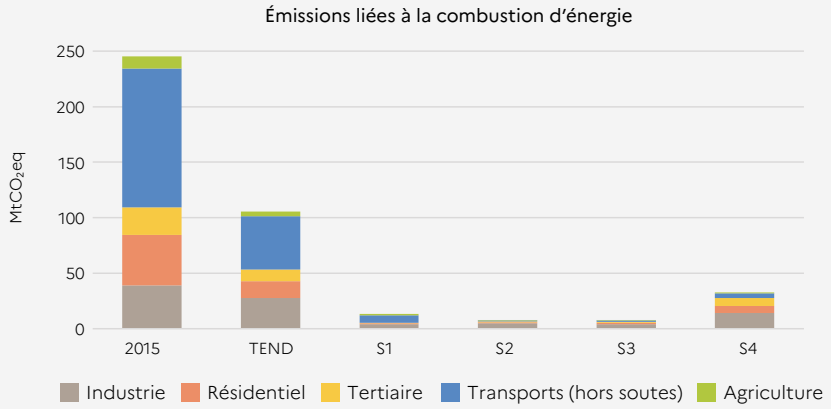
Note de lecture : les émissions sont représentées positivement et les puits négativement en dessous de l'axe des abscisses. Mais la contribution des technologies de CCS au bilan *(Graphique 12)* est considérée comme une réduction d'émissions et non comme un puits. On la visualise négativement dans la partie supérieure du graphique. Les émissions non énergétiques de l'agriculture sont des émissions de CH_4, N_2O et CO_2. Les autres émissions sont des GES issus des procédés industriels, de l'incinération et du stockage des déchets.

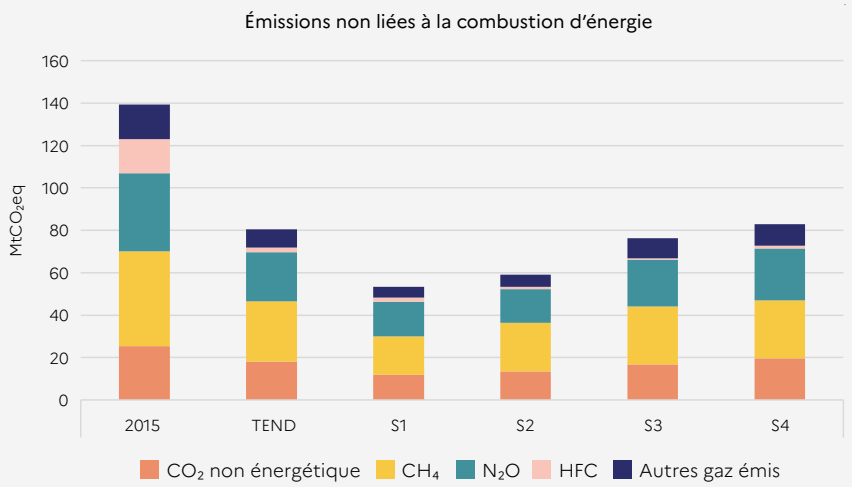
* DACCS : *direct air carbon capture and storage.*
** BECCS : *bioenergy with carbon capture and storage.*
*** HFC : hydrofluorocarbures (gaz réfrigérants).
**** CCS : *carbon capture and storage.*

Tableau 1 *Synthèse du bilan des émissions nettes en 2050*

Unité : $MtCO^2eq$	Émissions	Puits naturels	CCS	Puits technologiques		Bilan net des émissions
				BECCS et DACCS	*DACCS seuls*	
TEND	217	- 73	- 8	- 5	-	131
S1	74	- 116	-	-	-	- 42
S2	68	- 93	- 2	- 1	-	- 28
S3	85	- 64	- 9	- 21	-	- 9
S4	135	- 41	- 37	- 56	*- 27*	1
SNBC	80	- 67	- 5	- 10	-	- 2

Graphique 14 *Niveau et composition des émissions de GES résiduelles en 2050*





Les émissions non liées à la combustion d'énergie sont données pour l'ensemble des secteurs. Il s'agit des émissions de GES autres que le CO_2 dégagé lors des processus de combustion.

Toutefois, **la cible d'émissions nettes nulles ou négatives en 2050 exprimée en tonnes CO_2-équivalent ne reflète pas l'effet des trajectoires d'émissions par type de gaz émis.** Le stock de gaz à effet de serre dans l'atmosphère détermine la contribution de la France au changement climatique. C'est donc la différence entre la somme des émissions et la somme des absorptions tout au long de la trajectoire qui compte.

Une extrapolation linéaire des émissions et de l'absorption a été réalisée pour donner une idée de l'ordre de grandeur de la contribution de la France à la neutralité carbone climatique mondiale *(Graphique 15)*. **Tous les scénarios accroissent le stock de gaz à effet de serre mais il existe une différence entre les scénarios selon cet indicateur.** Le scénario 1 est celui qui réduit davantage les émissions grâce à une diminution des usages énergétiques enclenchée plus rapidement que dans S4 qui privilégie le déploiement des puits technologiques et du CCS. En prenant en compte l'intégrale des émissions nettes, la différence entre les scénarios s'accentue : en comparaison aux 42 $MtCO_2eq$ d'émissions nettes qui distinguent S1 et S4 en 2050 *(Tableau 1)*, la différence d'émissions nettes annuelles moyennes entre ces deux scénarios est doublée (de l'ordre[13] de 70 $MtCO_2eq$) lorsqu'on prend en compte l'ensemble de la trajectoire 2020-2050 *(Graphique 15)*, ce qui conduit sur la période 2020-2050 à **2 milliards de tCO_2eq d'émissions cumulées dans S4 supplémentaires par rapport à S1**. Cette approximation est par ailleurs optimiste : en réalité la trajectoire ne sera pas linéaire, car les mesures qui ne sont pas en place aujourd'hui devront monter en puissance.

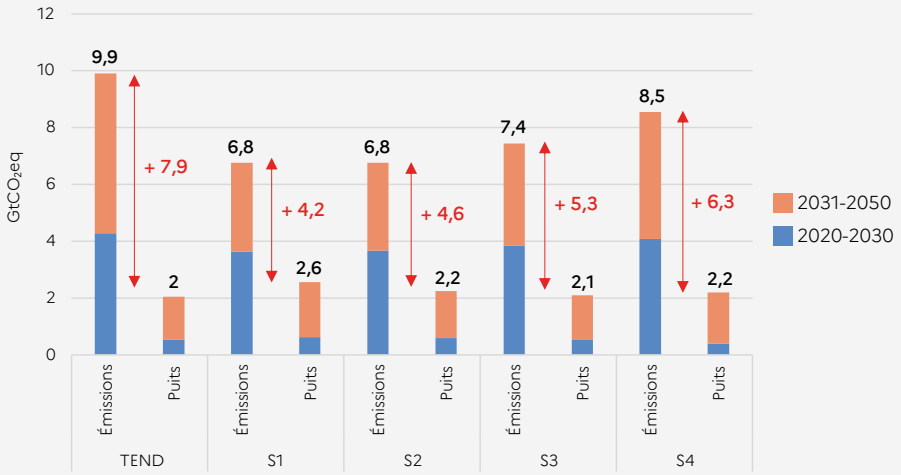
Il faut également noter que **la contribution des gaz à effet de serre diffère entre les scénarios *(Graphique 14)*, ce qui se traduit par des différences possibles des contributions des scénarios au réchauffement climatique**. Les puits technologiques développés dans S4 absorbent du CO_2, tandis que les émissions de méthane et de protoxyde d'azote issues de l'agriculture sont plus importantes dans ce scénario et restent dans l'atmosphère. Les contribu-

13 Le *Graphique 15* montre que S4 cumule 6,3 $GtCO_2eq$ d'émissions nettes sur 30 ans (soit 210 $MtCO_2eq$/an en moyenne), contre 4,2 $GtCO_2eq$ pour S1 (140 $MtCO_2eq$/an). Soit une différence de 70 $MtCO_2eq$/an en moyenne.

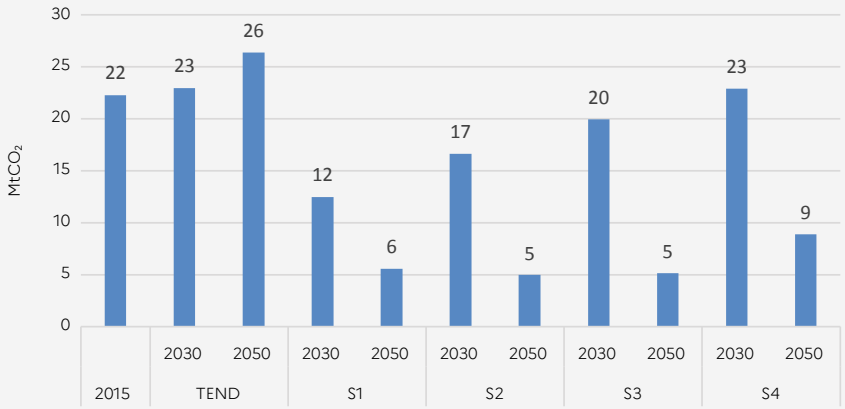
tions sur l'évolution du climat à moyen terme pourraient donc différer entre les scénarios dans la mesure où le pouvoir réchauffant de ces gaz est supérieur au CO_2 mais perdure moins longtemps.

Enfin, rappelons que **les résultats précédents du bilan d'émissions nettes correspondent au périmètre territorial de l'inventaire des émissions des pays (ici le territoire de la France métropolitaine)**. Ils n'intègrent pas les émissions de CO_2 provenant de la combustion des carburants contenus dans les soutes des avions et des bateaux pour les trajets internationaux. Or, ces émissions restent importantes en 2030 et 2050 *(Graphique 16)*. Par ailleurs, la comptabilité territoriale des émissions attribue à la France les émissions réalisées sur son territoire pour produire des biens et services exportés et consommés à l'étranger. En revanche, elle ne comptabilise pas les émissions qui résultent de la production des biens et services importés et consommés en France. Selon la recommandation du Haut Conseil pour le Climat de 2020 [5], une étude complémentaire présentera une évaluation de « l'empreinte » carbone et matière de la consommation des Français (publication complémentaire en 2022).

Graphique 15 *Émissions et absorptions de gaz à effet de serre cumulées sur la période 2020-2050*



Graphique 16 *Émissions annuelles du transport international attribuées à la France (50 % des trajets aériens et maritimes)*



Les émissions sont comptabilisées pour 100 % des trajets vers les départements et régions d'outre-mer, ainsi que 50 % des trajets vers et en provenance d'autres pays. Les facteurs d'émissions sont donnés par le CITEPA.

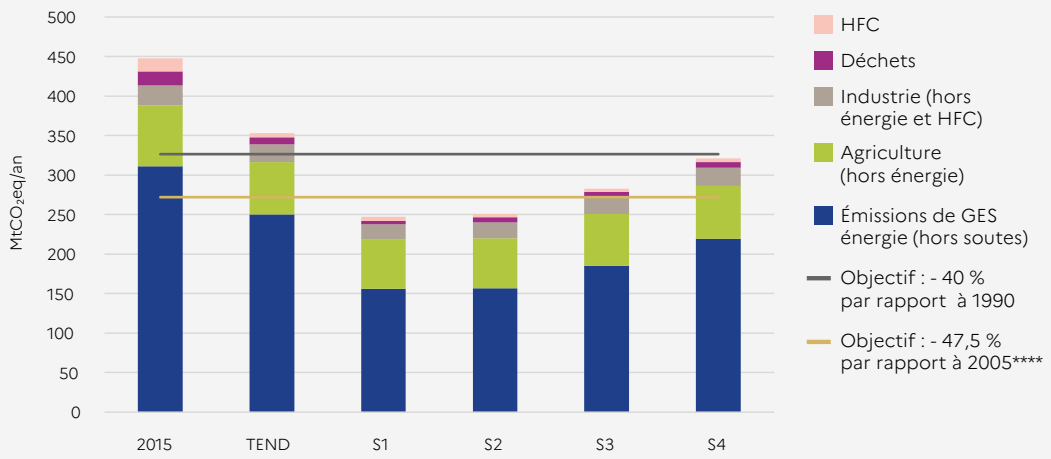
7. Position des scénarios par rapport aux objectifs Énergie-Climat

À l'horizon 2030, les baisses d'émission de GES dans tous les scénarios (à l'exception du tendanciel) dépassent l'objectif français actuel inscrit dans le Code de l'Énergie (2021) [6], correspondant à une réduction de 40 % par rapport au niveau d'émission de 1990 *(Graphique 17)*. **En revanche, seuls S1 et S2 atteignent une réduction de 55 % correspondant au nouvel objectif 2030 pour l'ensemble de l'Europe (2021)** [7]. La traduction de cet objectif à - 50 % en 2030 pour la France est un chiffre indicatif qui est mis aujourd'hui sur la table des négociations par la Commission européenne. Le chiffre réel dépendra des discussions en cours sur le paquet *Fit for 55 %*. Des transformations accélérées permettant des réductions d'émissions encore plus fortes seraient donc nécessaires dans l'hypothèse où la contribution demandée à la France serait plus importante que l'objectif moyen (ce qui pourrait être le cas si des budgets carbone moins contraignants sont attribués à certains pays européens disposant de moindres capacités et moyens d'action). En 2050, seul S4 n'atteint pas l'objectif de réduction d'émissions de la loi Énergie-Climat.

Graphique 17 Position des scénarios par rapport aux objectifs Énergie-Climat

	2018	2030	2050
TEND	- 19 %	- 34 %	- 60 %
S1	- 19 %	- 54 %	- 86 %
S2	- 19 %	- 53 %	- 87 %
S3	- 19 %	- 47 %	- 84 %
S4	- 19 %	- 40 %	- 75 %
Obj. LTECV (2015)* avant 2019	-	- 40 %	- 75 %
Obj. LEC (2019)**	-	- 40 %	- 83 %
Obj. EU (2021)***	-	- 50 %	-

Comparaison avec les objectifs de réduction d'émission français et européens en 2030 par rapport à 1990



* Objectif inscrit dans la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) [8] du 17 août 2015.
** Objectif inscrit dans la loi Énergie-Climat (LEC) [3] adoptée en 2019.
*** Objectif européen envisagé pour la France (en cours de discussion) dans le cadre du paquet *Fit for 55%* [7].
**** L'objectif de baisse des émissions françaises de - 47,5 % en 2030 par rapport à 2005 correspond à une cible de - 50 % par rapport à 1990. Il est envisagé dans le paquet *Fit for 55%* pour la révision du règlement de partage de l'effort (ESR).

Du côté de l'évolution des systèmes énergétiques, les scénarios de neutralité carbone enclenchent des ruptures par rapport au scénario de prolongation des tendances (scénario tendanciel) qui permettent d'atteindre la plupart des objectifs inscrits aujourd'hui dans la loi *(Tableau 2)*. Néanmoins, certains objectifs pourraient être ajustés dans le futur en fonction de la prochaine Stratégie Nationale Bas Carbone qui sera adoptée en 2023. Les scénarios de moindre économie d'énergie (S3 et S4) ne respectent pas les objectifs actuels de limitation des consommations finales d'énergie sur toute la trajectoire (horizons 2030 et 2050), tandis que S1 et S2 vont au-delà de ces objectifs en réduisant davantage les consommations. Cette distinction se retrouve également dans la limite autorisée de consommation primaire d'énergies fossiles.

La part d'énergies renouvelables dans les transports en 2030 est légèrement en deçà de l'objectif dans S1 et S2, tandis qu'elle est sensiblement dépassée dans S3 et S4 en lien avec les différences de stratégie. Dans les premiers scénarios, la mobilité et les consommations d'énergie dans les transports sont moindres, ce qui offre un peu plus de temps pour remplacer les équipements et les sources d'énergies fossiles, sans pour autant émettre davantage de CO_2. **Concernant les réseaux de chaleur, l'objectif de multiplier par cinq la chaleur produite à partir d'EnR&R en 2030 par rapport à 2012 (soit 39,5 TWh) n'est proche d'être atteint que dans S2 et S3 (avec respectivement 33,4 et 38,7 TWh).** Cet objectif est obtenu grâce à une croissance significative de l'usage de la biomasse et dans une moindre mesure des UIOM[14] (pour S2) et de la géothermie (pour S3). Les indicateurs concernant les objectifs de la loi sur la part d'énergie renouvelable et de nucléaire dans la production d'électricité seront présentés dans le feuilleton d'analyse de l'évolution du système électrique.

Dans l'ensemble, la cohérence des stratégies et des scénarios ne permet pas de fixer des objectifs indépendamment, mais de réévaluer certains objectifs en fonction de l'évolution d'autres facteurs pour être en mesure de sécuriser l'atteinte de la cible finale de neutralité carbone. Par exemple, les baisses moins importantes de consommation d'énergie finale dans certains scénarios doivent pouvoir être compensées en dépassant les objectifs d'usage d'énergies décarbonées.

Tableau 2 Comparaison des scénarios avec les objectifs français d'évolution des systèmes énergétiques

	Consommation finale énergétique par rapport à 2012		Consommation primaire d'énergie fossiles par rapport à 2012		Proportion des renouvelables dans la consommation finale d'énergie	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
TEND	- 8 %	- 21 %	- 17 %	- 50 %	26 %	43 %
S1	- 29 %	- 58 %	- 47 %	- 89 %	34 %	88 %
S2	- 25 %	- 54 %	- 46 %	- 94 %	32 %	86 %
S3	- 15 %	- 41 %	- 39 %	- 96 %	33 %	81 à 87 %***
S4	- 10 %	- 24 %	- 26 %	- 79 %	29 %	70 %
Obj. LTECV*	**- 20 %**	**- 50 %**	**- 30 %**	**-**	**32 %**	**-**
Obj. LEC 2019**	**id.**	**id.**	**- 40 %**	**-**	**33 %**	**-**

	Proportion d'énergies renouvelables dans la consommation de gaz, de chaleur et des transports					
	Gaz		Chaleur		Transports	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
TEND	8 %	20 %	64 %	85 %	12 %	31 %
S1	18 %	88 %	73 %	90 %	14 %	80 %
S2	17 %	84 %	76 %	90 %	13 %	93 %
S3	16 %	85 %	79 %	90 %	17 %	87 à 93 %***
S4	12 %	52 %	66 %	88 %	17 %	76 %
Obj. LTECV*	**10 %**	**-**	**38 %**	**-**	**15 %**	**-**
Obj. LEC 2019**	**id.**	**-**	**id.**	**-**	**id.**	**-**

* Objectifs inscrits dans la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) [8] du 17 août 2015.
** Objectifs inscrits dans la loi Énergie-Climat (LEC) [3] du 8 novembre 2019.
*** Valeurs dépendant des choix de politiques industrielles de développement des filières éolien flottant ou nucléaire.
N.B. : les objectifs concernant l'électricité seront présentés dans un feuilleton complémentaire sur le mix électrique.

14 Unité d'incinération d'ordures ménagères.

8. Besoins en matériaux et gestion des ressources non énergétiques

Pour la première fois dans ses scénarios prospectifs, **l'ADEME a évalué l'évolution des besoins en matériaux, ainsi que la consommation et la gestion de ressources non énergétiques (eau et déchets)**.

Pour les résultats des premières évaluations, nous renvoyons le lecteur aux chapitres sectoriels :

- les besoins en matériaux et ressources et les déchets pour le bâtiment dans la construction neuve (*cf.* chapitre *2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires, sections 5.6.11* et *5.6.12*);
- les besoins en eau d'irrigation pour l'agriculture et les indicateurs de résilience (*cf.* chapitre *2.2.1. Production agricole, section 6*);
- la gestion des déchets : recyclage des matériaux, valorisation énergétique, incinération sans récupération d'énergie ou stockage (*cf.* chapitre *2.4.1. Déchets, section 5.6*).

Le *Tableau 3* résume quelques indicateurs de comparaison des scénarios tirés de ces évaluations.

Des analyses complémentaires seront publiées en 2022. Elles compléteront l'évaluation de la gestion des ressources dans la transition écologique. Cette publication comprendra :

- une quantification des besoins en métaux, en particulier, pour le développement des énergies renouvelables et les combustibles nucléaires, mais aussi pour les transports (batteries);
- une quantification de l'évolution de l'empreinte globale de la consommation des Français pour différentes catégories de biomasses, de combustibles fossiles, de minerais non métalliques et de métaux.

Tableau 3 Quelques premiers indicateurs sur l'évolution des matériaux et des ressources en 2050

Indicateurs	2015	2050			
		S1	S2	S3	S4
Quantités de déchets collectés hors travaux publics [Milliers de tonnes, Mt]	141	60	65	104	93
Déchets en centre de stockage de déchets non dangereux et non inertes [Mt/an]	18,4	1,1	0,6	1,5	3,2
Quantités de matériaux de construction nécessaires [Mt, moyenne annuelle 2015-2050]	51	18	22	40	37
Quantités de matériaux de construction réemployés [Mt]	0,55	3,9	3,7	3,7	12
Consommation d'eau en agriculture pour l'irrigation [Mdm³]	3,3	1,8	2,3	3,1	4,5

9. Évolutions des émissions de polluants

Afin de vérifier l'impact des scénarios sur la qualité de l'air, **une analyse qualitative des évolutions des émissions de polluants liées aux différents scénarios a été réalisée par le CITEPA** sur certains secteurs et polluants sensibles[15] :

- le secteur résidentiel et les émissions de PM_{10} et $PM_{2,5}$. Les particules sont en effet les polluants les plus problématiques associés à la combustion du bois ;
- les transports et les émissions de NO_x, PM_{10} et $PM_{2,5}$;
- l'agriculture et les émissions de NH_3.

SECTEUR RÉSIDENTIEL

Dans le secteur résidentiel, un premier niveau d'analyse qualitative a été établi à partir des évolutions de la consommation des combustibles et des facteurs d'émissions de particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$) associés à chaque type d'énergie.

Pour les combustibles fossiles (fioul domestique, gaz naturel et gaz de pétrole liquéfié), les facteurs d'émissions sont supposés constants sur la période 2015-2050 en première analyse.

La consommation du bois bûche dans le résidentiel diminue dans tous les scénarios ainsi que dans le scénario tendanciel. Cependant, la baisse est moins prononcée dans S1 et S2 par rapport au tendanciel et plus importante dans S3 et S4. Les consommations de granulés et plaquettes augmentent fortement jusqu'en 2030 dans l'ensemble des scénarios par rapport à 2015. Les consommations des plaquettes ont été assimilées à des granulés. Dans l'ensemble des scénarios et de façon similaire, le parc des appareils à bois s'améliore progressivement entre 2015 et 2050 grâce à la diffusion d'appareil plus performants, le remplacement des anciens appareils et la baisse d'utilisation des foyers ouverts.

Tous les scénarios conduisent à une baisse des émissions de PM_{10} et de $PM_{2,5}$ en 2050 mais avec des niveaux disparates en lien principalement avec les niveaux de consommations de bois et la part des granulés. S4 qui conjugue baisse de la consommation de bois et forte proportion de granulés permettrait d'atteindre une très forte réduction de PM_{10} et de $PM_{2,5}$ en 2050 par rapport à 2015. En revanche, S1, où les évolutions sont inverses, atteint un niveau de réduction d'émissions de particules moindre. Les scénarios 2, 3 et tendanciel se situent tous entre ces deux extrémités.

TRANSPORTS

Dans le domaine des transports, un premier niveau d'analyse qualitative a été établi à partir des évolutions des trafics par catégorie de véhicules en motorisations thermiques ou alternatives et des facteurs d'émission liés aux différents scénarios.

Les scénarios envisagés devraient réduire les émissions de NO_x des trafics routier et ferroviaire en 2050 par rapport au scénario tendanciel. L'évolution des émissions de PM hors échappement (abrasion des freins, pneus et de la chaussée) devra être étudiée plus en détail dans le cadre de l'analyse quantitative. **Concernant les transports fluvial, maritime, aérien domestique et international, tous les scénarios envisagés devraient réduire les émissions de NO_x et de PM en 2050** par rapport au scénario tendanciel.

Pour le transport routier, de façon générale, le trafic diminue entre 2015 et 2050 pour tous les scénarios et toutes les motorisations. Au sein de ces trafics, celui des véhicules électriques est en augmentation dans tous les scénarios et ceux de l'hydrogène et du GNV pour S2, S3 et S4. Le trafic global diminue pour S1, S2 et S3 et augmente pour S4. Les facteurs d'émissions sont à la baisse (généralisation des dernières normes dans le parc). **Les émissions de NO_x baissent pour tous les véhicules sauf GNV en fin de période. Les émissions de PM de la combustion baissent grâce à la réduction du parc de véhicules Diesel sans filtre à particules.**

Pour le transport ferroviaire, le GNR (Gazole Non Routier) est remplacé par du GNV et/ou de l'électricité avec des trafics qui augmentent, ce qui amène des évolutions différenciées des consommations entre 2015 et 2050 suivant les scénarios : augmentation pour S1 et S2, diminution pour S3 et S4. Les facteurs d'émission sont considérés constants. Les émissions de NO_x suivent les consommations. Les émissions de PM de la combustion baissent grâce au GNV mais celles liées à l'abrasion pourraient augmenter à défaut de la mise en œuvre de solutions de captage.

15 Une analyse quantitative sera publiée dans une publication complémentaire en 2022.

Pour le transport fluvial, le GNR est remplacé par du GNV et/ou de l'électricité avec globalement des consommations constantes, sauf pour S4 où les consommations totales diminuent entre 2015 et 2050. L'électrification devrait diminuer les émissions de NO_x et de PM.

Pour le transport maritime, les consommations sont stables entre 2015 et 2050 sauf pour le tendanciel et S4 où les consommations augmentent légèrement. Le transfert du fioul lourd vers le GNL fait baisser les émissions de NO_x et de PM en 2050 par rapport au scénario tendanciel.

Pour le transport aérien domestique, seul le scénario tendanciel a des consommations qui augmentent entre 2015 et 2050, alors que dans S1, S2 et S3 elles diminuent et sont stables dans S4. Pour le transport aérien international, le scénario tendanciel, S3 et S4 ont des consommations qui augmentent entre 2015 et 2050, alors que dans S1 et S2, elles diminuent. Les facteurs d'émission sont aussi supposés constants, même si une amélioration des moteurs est attendue. Quelle que soit l'hypothèse retenue, les scénarios envisagés devraient réduire les émissions de NO_x et de PM (combustion et abrasion) en 2050 par rapport au scénario tendanciel.

AGRICULTURE

Dans le secteur de l'agriculture, un premier niveau d'analyse qualitative a été établi à partir des données d'activité projetées (cheptels, apport d'azote minéral total et par formes) ainsi que de l'évolution des pratiques agricoles. L'ammoniac est le polluant principal impacté par ces hypothèses. Même si les réductions d'émissions estimées par le CITEPA à l'horizon 2050 sont moins importantes que celles évaluées par l'ADEME (du fait d'écart de modélisations), il paraît assez certain que **les quatre scénarios à l'étude conduisent à une baisse des émissions de NH_3 et le classement des scénarios est identique avec du moins émetteur au plus émetteur : S2 < S1 < S3 < S4.**

Cette baisse des émissions de NH_3 attendue pour l'ensemble des scénarios est liée :

- **pour les cheptels bovins**, au recul des cheptels, qui compenserait en S3 et S4 les émissions supplémentaires en lien avec la hausse de productivité ;
- **pour les cheptels porcins et volailles**, au déploiement des bonnes pratiques et à la réduction des effectifs ;
- **pour la gestion des déjections**, au recul des cheptels et au déploiement des bonnes pratiques de stockage et de retour au sol ;
- **pour la fertilisation minérale**, au recul de l'azote minéral total épandu, au recul des formes les plus émettrices et au déploiement des bonnes pratiques d'épandage.

Seules des estimations quantitatives permettront de consolider ces premières évaluations. L'impact de ces émissions sur les concentrations de polluants dans l'air, dont l'ozone, sensible au réchauffement climatique, reste également à investiguer.

10. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

[1] **Service de l'observation et des statistiques (SoeS), ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Datalab**, *Bilan énergétique de la France pour 2015*, 2016 (https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bilan-energetique-de-la-france-pour-2015-novembre2016_1.pdf).

[2] **CITEPA**, *Facteurs d'émission CO_2 et pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) nationaux (valeurs par défaut) par type de combustible* (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ETS_Valeurs_nationales_Citepa%20_2022.pdf).

[3] **Loi Énergie-Climat**, loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, Légifrance, 2019 (https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000039355955/).

[4] **SNBC**, Décret n° 2020-457 du 21 avril 2020 relatif aux budgets carbone nationaux et à la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC 2), Légifrance, 2020 (https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041814459/).

[5] **HCC**, *Maîtriser l'empreinte carbone de la France*, Rapport du Haut Conseil pour le Climat, Octobre 2020 (https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/10/hcc_rapport_maitriser-lempreinte-carbone-de-la-france-1.pdf).

[6] **Code de l'énergie**, Légifrance, 2021 (https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000039369320/).

[7] **EU**, *Regulation of the European Parliament and of the Council of establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC),* n° 401/2009 and (EU) 2018/1999 (European Climate Law), Brussels, 25 juin 2021 (https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-27-2021-INIT/en/pdf).

[8] **LTECV**, *Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte,* 2015 (https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031044385).

2. ENSEIGNEMENTS, LIMITES ET PERSPECTIVES

676 Enseignements

678 Limites et perspectives

680 En conclusion

1. Enseignements

01

L'ADEME présente quatre voies qui pourraient permettre d'atteindre la neutralité carbone de la France en 2050, chacune dotée de sa propre cohérence interne. Mais toutes sont difficiles et nécessitent que les orientations collectives soient discutées et décidées rapidement pour accélérer la transition : certains choix, à plus ou moins court terme, peuvent être incompatibles avec l'orientation de tel ou tel scénario. Quelle que soit la voie choisie, parmi ces quatre ou d'autres menant à la neutralité carbone, **il faut veiller à la cohérence d'ensemble des choix réalisés, grâce à une planification orchestrée des transformations, associant État, territoires, acteurs économiques et citoyens.**

02

Atteindre la neutralité repose sur des paris humains ou technologiques forts dans tous les cas mais qui diffèrent selon les scénarios : régulation de la demande, changement de comportement, déploiement de technologies dans tous les secteurs... Ces hypothèses de ruptures sont des conditions de réalisation des scénarios. En particulier le scénario « S1 : Génération frugale » présente une mutation sociale rapide qui induit un risque fort quant à son acceptation et le scénario « S4 : Pari réparateur » comporte un pari risqué sur les technologies de captage et stockage de CO_2, notamment BECCS et DACCS[1], encore peu développées à ce jour. S1 et S4 apparaissent donc comme des scénarios limites dans cet univers des possibles.

03

Pour tous les scénarios, il est impératif d'agir rapidement : l'ampleur des transformations sociotechniques à mener est telle que ces dernières mettront du temps à produire leurs effets. Il faut entreprendre dès cette décennie la planification et la transformation profonde des modes de consommation, de l'aménagement du territoire, des technologies et des investissements productifs. À titre d'exemple, tous les scénarios nécessitent une augmentation des capacités de production de biométhane de plus de 3 TWh/an (soit 150 nouveaux méthaniseurs/an environ), ainsi qu'une très forte croissance des capacités électriques des énergies renouvelables, EnR (+ 5,5 à + 8,9 GW/an en moyenne sur la période 2020-2050, selon les scénarios). Cependant, ces efforts mettront du temps. Ainsi, les scénarios « S3 : Technologies vertes » et S4, qui s'appuient surtout sur les développements technologiques, présentent des émissions significativement plus élevées en 2030 que les scénarios S1 et « S2 : Coopérations territoriales », qui mobilisent davantage le levier de la sobriété et plus largement, de la régulation de la demande.

04

La réduction de la demande d'énergie est le facteur clé pour atteindre la neutralité carbone : de - 23 % (S4) à - 55 % (S1) pour la demande finale en 2050 par rapport à 2015 suivant les scénarios. Cela nécessite cependant une modification radicale des usages et des techniques de l'habitat, des mobilités ainsi qu'une adaptation profonde du système productif agricole et industriel. La réduction plus (S1) ou moins (S4) forte de la consommation de ressources naturelles, notamment grâce à l'économie circulaire, participe directement à cette baisse de la demande d'énergie. Elle se matérialise par ailleurs par la quantité de déchets collectés qui augmente de S1 à S4. Elle nécessite de transformer les imaginaires et les pratiques de consommation pour engager un cercle vertueux de sobriété.

05

L'industrie va devoir se transformer non seulement pour s'adapter à une demande en profonde mutation (baisse des volumes produits, exigences de durabilité...) mais également pour décarboner sa production. Cela nécessitera des plans d'investissements de grande ampleur (décarbonation des mix énergétiques, efficacité énergétique et matière, captage et utilisation

1 Outre la réduction des émissions industrielles par des technologies de CCS (*carbon capture and storage*), les puits technologiques employés sont :
- le recours à du CCS sur des unités fonctionnant à la biomasse (bioraffinerie ou cogénération bois), BECCS (*biomass energy CCS*) ;
- le recours nécessaire à du CCS sur air ambiant (*direct air carbon capture and storage* [DACCS]).

ou stockage du CO_2...), tant pour la massification de technologies matures que pour l'émergence d'innovations de rupture dans les procédés industriels et pour le déploiement des infrastructures nécessaires. **Une compréhension et construction de ces transformations par l'ensemble de la société** (citoyens, salariés) sera primordiale pour fédérer autour de cette « nouvelle révolution industrielle bas carbone ».

06

Le vivant est l'un des atouts principaux de cette transition. Outre la valeur propre des écosystèmes pour la préservation de la biodiversité et les autres fonctions écologiques et d'aménagement du territoire, sa contribution à la décarbonation de la France repose sur trois leviers spécifiques et interdépendants : le potentiel de réduction des GES, le potentiel de stockage naturel de carbone et le potentiel de mobilisation de biomasse renouvelable substituable aux ressources fossiles. Les scénarios de l'ADEME présentent quatre équilibres possibles et contrastés entre services attendus (alimentation, stockage du carbone, biomasse...), impacts des systèmes de production et aménagement du territoire.

07

L'adaptation des forêts et de l'agriculture devient donc absolument prioritaire pour lutter contre le changement climatique. Tous les scénarios montrent le rôle primordial de la préservation des puits de carbone et de la capacité à produire de la biomasse en 2050. Les évènements extrêmes déjà observés (méga-feux, inondations, attaques de parasites...) illustrent l'impact catastrophique du changement climatique, qui pourrait générer un effondrement de certains milieux naturels vivants et remettre en cause la faisabilité de tous les scénarios. Au-delà de l'intérêt de protéger les écosystèmes pour leur valeur propre, renforcer leur résilience est donc un enjeu absolument prioritaire de la lutte contre le changement climatique, notamment pour préserver les stocks de carbone et les capacités de production de biomasse.

08

La pression sur les ressources naturelles est très différente d'un scénario à l'autre. C'est particulièrement le cas pour l'eau d'irrigation ou les matériaux de construction, dont les volumes consommés varient d'un facteur 2 entre le scénario le moins consommateur et le plus consommateur. Même constat sur les sols artificialisés, en légère baisse par rapport à aujourd'hui pour S1, mais en hausse de + 40 % pour S4[2]. Par ailleurs, le recyclage ne pouvant pas combler le déficit de matière, il est nécessaire d'économiser la matière le plus possible.

09

Dans tous les scénarios étudiés, l'approvisionnement énergétique repose à plus de 70 % sur les énergies renouvelables en 2050. L'électricité est, dans tous les cas, le vecteur énergétique principal (entre 42 et 56 % suivant les scénarios), mais sa production décarbonée ne peut pas être un prétexte à son gaspillage, afin de limiter la pression sur les ressources. Le mix varie entre les scénarios, en fonction du niveau de consommation mais aussi des choix techniques, qui s'appuient sur un développement plus ou moins dynamique des EnR et/ou sur le nouveau nucléaire (S3 et S4). Le gaz reste indispensable dans tous les scénarios, avec un niveau d'approvisionnement allant de 148 TWh (S1) à 371 TWh (S4) et un potentiel de décarbonation (biogaz, gaz de synthèse) qui peut être très élevé dans S1, S2 et S3 (environ 85 %, contre 51 % pour S4).

2 Incompatible avec la loi climat et résilience 2021, qui prévoit en 2050 une absence de toute artificialisation nette des sols.

2. Limites et perspectives

Cet exercice intègre des avancées analytiques dans un certain nombre de domaines jusque-là encore insuffisamment étudiés dans les prospectives du climat, comme l'évaluation de la disponibilité et des choix d'usage de la biomasse, l'évaluation de l'évolution des puits biologiques et techniques permettant de séquestrer des gaz à effet de serre, l'évolution des quantités de production industrielle induites par les évolutions de la consommation, et, ce qui sera publié en 2022 : la description de l'évolution de filières et des modes de vie, l'évaluation de l'empreinte de la consommation des Français en ressources physiques et gaz à effet serre, la robustesse à des incertitudes macroéconomiques. **Les efforts d'amélioration des méthodes d'évaluation et des connaissances doivent être soutenus et poursuivis sur la durée.**

Chaque chapitre sectoriel du rapport principal souligne les limites de l'analyse et donne des perspectives d'approfondissement des connaissances qui apparaîssent prioritaires pour les années à venir. Nous soulignons ici quelques limites et perspectives transverses à cet exercice de prospective.

APPORTS ET LIMITES DE LA MODÉLISATION

Tout modèle opère une simplification nécessaire pour isoler et rendre intelligibles certaines réalités. Ceux utilisés dans cet exercice reposent sur des hypothèses et des degrés de finesse variés. Un travail sera effectué pour mettre à disposition en 2022 plus de détails sur la description des modélisations, les données, les hypothèses et les résultats, dans un souci de transparence et d'amélioration continue de l'évaluation. Il n'a néanmoins pas été possible de quantifier toutes les marges d'incertitude associées aux résultats des modélisations. Les résultats présentés ici doivent donc être considérés comme des ordres de grandeur et non comme une analyse d'impact précise des leviers d'action explorés par les scénarios. Enfin, l'évaluation a porté sur des grandes orientations de transformations sans évoquer en détail les moyens d'action qui permettraient de les réaliser. Des travaux d'évaluation complémentaires sont nécessaires, en particulier pour comparer différentes politiques et identifier des paquets de mesures performants et cohérents.

CRISES ET RUPTURES

Aucune discontinuité ou situation de crise n'a été modélisée, qu'il s'agisse de ruptures économiques, sociales, environnementales ou systémiques. Le passé montre pourtant que les trajectoires d'évolutions des sociétés sont marquées par des crises, qui façonnent les évolutions sur le court terme, mais aussi sur le moyen et le long terme.

Aussi des ruptures et transformations profondes décrites dans les scénarios pourraient-elles plus facilement advenir dans un contexte de crise ou suite à une crise majeure ? Ce rôle des crises comme accélérateurs de changement ou comme une possibilité de rendre plus acceptables certaines évolutions fortes au sein de la population, a été identifié de manière qualitative par le panel de répondants, dans l'étude sur les modes de vie en lien avec les scénarios. Néanmoins, **les moyens de déclencher ces transformations tout en évitant des coûts économiques, sociaux et environnementaux trop élevés doivent être étudiés prioritairement et mis en œuvre**.

AU-DELÀ DE LA FRANCE : EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE

En accord avec la Stratégie Nationale Bas Carbone, la neutralité ciblée dans cet exercice est définie à l'échelle de la France et sur des émissions territoriales, sans prendre en compte l'empreinte énergétique (et encore moins environnementale) globale du mode de vie des Français. Il est possible que certains choix opérés dans les scénarios (import de gaz renouvelable ou décarboné ; métaux et matériaux nécessaires à la construction, aux biens de consommation ou à l'énergie…) conduisent à réduire les émissions GES sur le sol français mais à les augmenter dans d'autres pays. Ainsi, l'analyse présentée dans ce rapport devra être complétée d'une évaluation de l'empreinte environnementale des scénarios. **Deux feuilletons viendront prochainement compléter la présente publication, l'un sur les métaux de la transition écologique, l'autre sur l'empreinte carbone et matière de la consommation des Français.**

AU-DELÀ DU CLIMAT : CONCILIATION D'OBJECTIFS

Les quatre scénarios stratégiques ont été construits pour respecter des cibles sur l'énergie et les gaz à effet de serre. Si d'autres impacts (consommation de matériaux, artificialisation des sols…) sont documentés, les scénarios ne sont pas conçus pour être optimisés dans une optique multicritère. Or, une telle approche pourrait amener à revoir certaines trajectoires. Cet exercice a par exemple mis en évidence que les choix en termes de modes constructifs (construction bois…) doivent prendre en compte les ressources rendues disponibles par une gestion durable de la forêt. Là encore, une perspective pour les travaux à venir sera **d'intégrer plus finement d'autres objectifs de développement durable, économiques, sociaux, environnementaux, pour étudier les pistes de synergies, les arbitrages et les**

compromis possibles. S'il peut être illusoire de trouver une stratégie optimale selon de multiples critères, une telle analyse sera surtout utile pour nourrir les réflexions et débats collectifs sur le « projet de société ».

ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Une première analyse a été menée avec des éléments qualitatifs et quantitatifs pour appréhender la résilience et la sensibilité des quatre scénarios au changement climatique.
Pour la forêt en particulier, la modélisation des ressources tient compte des effets directs du changement climatique (modification des précipitations et températures) mais de grandes incertitudes persistent sur l'impact des perturbations extrêmes (canicules, incendies, tempêtes...).
Ainsi, **l'étude des impacts du changement climatique sur les différents secteurs doit être approfondie de façon à concevoir une stratégie qui intègre davantage les objectifs d'atténuation et d'adaptation**. Tout comme sur la biodiversité, une analyse territorialisée sur le sujet semble indispensable.

BIODIVERSITÉ ET ÉCOSYSTÈMES

Dans le cadre de ce travail de prospective, aucun chiffrage précis n'a été réalisé sur les impacts vis-à-vis de la biodiversité et des écosystèmes. Des discussions sont en cours avec l'Office français pour la biodiversité au moment de la rédaction de ce rapport.

RESSOURCE EN EAU

La question de l'usage de l'eau et les impacts de chaque scénario sur la ressource et les milieux aquatiques n'ont pas pu être étudiés de manière approfondie. Néanmoins des réflexions ont été initiées avec des partenaires de l'ADEME (Agences de l'eau Adour-Garonne et Seine-Normandie) et des travaux seront nécessaires pour approfondir ce sujet stratégique.

TERRITORIALISATION DES SCÉNARIOS

La question de la régionalisation des enjeux de transition, et plus particulièrement de la forte reterritorialisation proposée dans S2, doit être approfondie pour permettre un passage à l'action cohérent avec les contraintes inhérentes à chaque territoire. Un travail a été initié avec certaines directions régionales de l'ADEME et devrait se poursuivre sur l'ensemble du territoire, y compris les DOM-COM hors périmètre de cette prospective.

UNE SOCIÉTÉ FAITE DE DIVERSITÉ

Les leviers explorés dans les scénarios expriment des moyennes pour l'ensemble des Français. Or, il convient d'explorer, au-delà des moyennes, la façon dont les différents groupes sociaux, porteurs de normes, de pratiques et de ressources différentes peuvent se saisir de ces leviers et des enjeux de transformation.
Il en est de même pour les aspects sociaux et d'équité de la transition. Les scénarios sont contrastés sur les questions de répartition de la richesse et des inégalités, sur les implications des principaux acteurs (citoyens, collectivités, État, entreprises...) ou sur le rôle et l'attractivité des territoires dans la transition.
Par rapport à la situation actuelle, l'étude sur les modes de vie permet d'identifier des éléments qualitatifs sur la désirabilité, la faisabilité et les conditions de réalisation des scénarios, à partir d'entretiens d'un échantillon de 31 personnes. Si ces entretiens permettent de mettre en évidence des éléments liés à la réception par des citoyens des différents scénarios, cette évaluation reste incomplète et il n'est pas possible de savoir dans quelle mesure ils pourraient donner lieu à des contestations ou des mouvements sociaux importants.
La promotion et l'accompagnement de ces transformations par des politiques publiques de sensibilisation, d'éducation, de formation sont indispensables au regard de l'ampleur du mouvement attendu, sauf à ce que celui-ci soit poussé par des crises majeures.

3. En conclusion

Les limites de cet exercice de prospective ne doivent pas en faire oublier son utilité.

Il offre une contribution de l'ADEME aux délibérations collectives à venir sur la Stratégie française sur l'Énergie et le Climat pour 2023 et pour les débats de l'élection présidentielle de 2022 au cours de laquelle, sur la question de la transition écologique, des propositions concrètes à la hauteur des enjeux devront émerger. En proposant ainsi quatre scénarios contrastés, il s'agit de susciter un débat argumenté entre des conceptions concurrentes sur la bonne stratégie à promouvoir.

Dans un souci de transparence, l'ADEME donne accès aux sources et données utilisées pour chacun de ces scenarios et rend ainsi disponibles les analyses pour les réexaminer, les approfondir, les discuter.

S'il y a un point de vigilance à souligner d'entrée de jeu en amont des débats à venir, c'est le caractère systémique de la transition écologique : comme déjà évoqué, il existe encore plusieurs trajectoires possibles mobilisant des leviers et impliquant des choix différents, à activer à plus ou moins court terme pour atteindre la neutralité carbone. Chaque scénario présente des forces et des faiblesses, ainsi que des opportunités et des risques différents. Cependant, **les choix devront être coordonnés. Il ne peuvent être, à plus ou moins court terme, incohérents ou incompatibles pour les divers aspects (économiques, techniques, environnementaux) des transformations envisagées**.

Cela souligne également un enjeu de gouvernance et le besoin de favoriser le dialogue et l'articulation des décisions de tous les acteurs, publics et privés, pour parvenir à réaliser une transition réussie. **Quel que soit le « scénario retenu », il faudra que des orientations collectives soient discutées et planifiées rapidement pour s'inscrire dans une trajectoire cohérente, intrinsèquement et avec l'ambition que la France s'est fixée.**

Sigles et acronymes

AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
AGEC	(Loi dite) Anti-gaspillage pour une économie circulaire
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
AME	Avec mesures existantes (scénario AME de la SNBC)
AMS	Avec mesures supplémentaires (scénario AMS de la SNBC)
ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail
AOM	Autorités organisatrices de la mobilité
BCIAT	Biomasse, Chaleur, Industrie, Agriculture et Tertiaire (appel à projets)
BE	Bois énergie
BECCS	*Bioenergy with carbon capture and storage* (biomasse énergie avec captage et stockage du carbone)
BI	Bois d'industrie
BIBE	Bois d'industrie et bois énergie
BO	Bois d'œuvre
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
CAPEX	*Capital expenditure* (dépenses d'investissement)
CAS	Changement d'affectation des sols
CASd	Changement d'affectation des sols direct
CASi	Changement d'affectation des sols indirect
CCS	*Carbon capture and storage* (captage et stockage du carbone)
CEE	Certificat d'économie d'énergie
CEREN	Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie
CIPAN	Culture intermédiaire piège à nitrates
CRE	Commission de régulation de l'énergie
DACCS	*Direct air carbon capture and storage* (captage du carbone dans l'air et stockage)
DETR	Dotation d'équipement des territoires ruraux
DMA	Déchets ménagers et assimilés
DMC	*Domestic Material Consumption* (consommation domestique de matières)
DRI	*Direct Reduction Iron* (fer à réduction directe)
DSIL	Dotation de soutien à l'investissement local
ECS	Eau chaude sanitaire
EDPM	Engin de déplacement personnel motorisé
EFESE	Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques
EMAG	Ester Méthylique d'Acide Gras
EMHA	Ester Méthylique d'Huiles Animales
EMHU	Ester Méthylique d'Huiles Usagées
EMHV	Ester Méthylique d'Huiles Vierges
ENEDIS	Gestionnaire du réseau de distribution de l'électricité (ex-ERDF)
EnR	Énergie renouvelable
EnR&R	Énergie renouvelable et de récupération
Eo	Exaoctets (1 018 octets)
EPR	*Evolutionary Power Reactor* (réacteur pressurisé européen)
FAO	*Food and Agriculture Organization*
FEDENE	Fédération des Services Énergie Environnement
GFC	Groupe froid à compression

GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
GNC	Gaz naturel comprimé
GNL	Gaz naturel liquéfié
GNV	Gaz naturel pour véhicules
GRDF	Gaz Réseau Distribution France
HAU	Huiles alimentaires usagées
HVHTE	Huile végétale hydrotraitée essence
HVO	*Hydrotreated Vegetable Oil* (huile végétale hydrogénée)
ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement
IDDRI	Institut du développement durable et des relations internationales
IGCE	Industries grandes consommatrices d'énergie
INDC	*Intended nationally determined contributions* (contributions nationales déclarées)
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IOT	*Internet of Things* (Internet des objets)
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (GIEC en français)
IRP	*International Ressources Panel* (Groupe d'experts international pour les ressources ou GIER)
ISDNDNI	Installation de stockage de déchets non dangereux non inertes
LTECV	Loi de transition énergétique pour la croissance verte
MaaS	*Mobility as a Service*
MOSUT	Modélisation systémique sur l'utilisation des terres
MPR	Matière première issue du recyclage
MPV	Matière première vierge
MTO	*Methanol-to-olefins*
NC	Neutralité carbone
NIMBY	*Not In My Backyard* (littéralement « pas dans mon jardin »)
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
ODD	Objectifs de développement durable
ONRB	Observatoire National des Ressources en Biomasse
OPEX	*Operational expenditure* (dépenses d'exploitation)
PAC	Pompe à chaleur
PAT	Projet alimentaire territorial
PCAET	Plan climat air-énergie territorial
PEM	*Proton Exchange Membrane* (membrane échangeuse de proton)
PLUi	Plan local d'urbanisme intercommunal
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
P-t-G	*Power-to-gas*
P-t-L	*Power-to-liquid*
P-t-M	*Power-to-methane*
P-t-O	*Power-to-olefins*
PTS	Plan de Transition Sectoriel
PUE	*Power Usage Effectiveness* (efficacité d'utilisation de la puissance)
REP	Responsabilité élargie du producteur
RMC	*Raw Material Consumption* (consommation de matières premières)
RTE	Réseau de Transport d'Électricité
SAfN	Solutions d'adaptation fondées sur la nature
SCoT	Schéma de cohérence territoriale

SDES	Service des données et études statistiques (ministère de la Transition écologique)
SEQE-UE	Système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne
SFEC	Stratégie Française Énergie-Climat
SFEN	Société Française d'Énergie Nucléaire
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone
SNCU	Syndicat national de chauffage urbain et de la climatisation urbaine
SNMB	Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse
SRADDET	Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
STEP	Station de transfert d'énergie par pompage
TCR	Taillis à courte rotation
TICC	Taxe intérieure de consommation sur le charbon
TICGN	Taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel
TICPE	Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques
TIRIB	Taxe incitative relative à l'incorporation de biocarburants
TRL	*Technology Readiness Level* (niveau de maturité technologique)
TTCR	Taillis à très courte rotation
TURPE	Tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité
UIOM	Unité d'incinération d'ordures ménagères
UNFCCC	*United Nations Framework Convention on Climate Change* (Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques)
VAE	Vélo à assistance électrique
VLS	Vélo en libre-service
VTC	Véhicule de tourisme avec chauffeur
VUL	Véhicule utilitaire léger
ZAN	Zéro artificialisation nette
ZFE	Zone à faibles émissions

Glossaire

4p1000 : initiative internationale lancée lors de la COP21 en 2015, abritée par l'Alliance CIAT-*Bioversity International* afin de promouvoir la compréhension du cycle du carbone et du rôle important du compartiment sol dans le stockage du carbone.

Agriculture de conservation : système cultural qui favorise une perturbation mécanique des sols minimale (pas de travail du sol), le maintien d'une couverture permanente du sol et la diversification des espèces végétales.

Agroécologie : système agricole qui consiste à appliquer des concepts et principes écologiques de manière à optimiser les interactions entre les végétaux, les animaux, les humains et l'environnement, sans oublier les aspects sociaux dont il convient de tenir compte pour que le système alimentaire soit durable et équitable.

Agroforesterie : désigne les pratiques, nouvelles ou historiques, associant arbres, cultures et/ou animaux sur une même parcelle agricole, en bordure ou en plein champ. Ces pratiques comprennent les systèmes agro-sylvicoles mais aussi sylvo-pastoraux, les pré-vergers (animaux pâturant sous des vergers de fruitiers)...

Biochar : résidu solide obtenu par chauffage de la biomasse sans oxygène, par pyrolyse. Le biochar relève de la gamme des matériaux appelés « charbon de bois » ou « noir de carbone ».

Bioéconomie : terme qui regroupe toute l'économie liée à la photosynthèse et au vivant. Sur un territoire, elle comprend donc les systèmes alimentaires, non alimentaires et de recyclage de la biomasse.

***Bioenergy with carbon capture and storage* (BECCS)** : production d'énergie à partir de biomasse avec captage et stockage du carbone.

***Carbon Contracts for Differences* (CCfD)** : un contrat carbone est un contrat par lequel un gouvernement ou une institution convient avec un agent d'un prix fixe du carbone sur une période donnée. Pendant la période contractuellement convenue, cet agent peut alors vendre toute réduction d'émission de carbone (ou quota) à ce prix donné. Si ces contrats sont formulés sous la forme d'un prix d'exercice sur un prix du marché du carbone (une option bilatérale), ils deviennent alors des contrats de carbone pour les différences (CCfD).

***Carbon capture and storage* (CCS)** : technologies permettant de capter le CO_2 à la sortie des cheminées des centrales électriques ou d'installations industrielles, de le comprimer, de le transporter vers un site de stockage et de le stocker sous terre.

Combustibles solides de récupération (CSR) : selon les termes de la norme NF-EN-15359, ce sont des combustibles solides préparés à partir de déchets non dangereux, utilisés pour la valorisation énergétique dans des usines d'incinération ou de co-incinération. En France, ils sont issus des refus de tri de déchets ménagers ou d'entreprises. À ne pas assimiler aux RDF européens (*Refused Derived Fuel*) qui, dans certains pays, peuvent être issus directement de déchets non triés.

Culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE) : culture non alimentaire implantée et récoltée entre deux cultures principales dans une rotation culturale. En plus de représenter un substrat de méthanisation, les CIVE jouent un rôle agronomique de couvert végétal, ne laissant pas le sol nu pendant l'interculture. Selon leur période d'implantation, on distingue les CIVE d'hiver, à cycle long, et les CIVE d'été, à cycle court.

Démobilité : réduction du poids des déplacements pour une mobilité choisie et frugale.

***Direct air carbon capture and storage* (DACCS)** : captage du CO_2 directement dans l'atmosphère puis stockage.

***Direct Reduction Iron* (DRI)** : étape de la production de l'acier consistant en la réduction directe (élimination de l'oxygène) du minerai de fer par un gaz réducteur (H_2 ou gaz naturel) à des températures inférieures au point de fusion du fer à 1 536 °C.

Économie de la fonctionnalité : relation commerciale qui consiste à fournir aux entreprises, individus ou territoires des solutions intégrées de services et de biens reposant sur la vente d'une performance d'usage ou d'un usage et non sur la simple vente de biens.

Flexitarisme : mode d'alimentation principalement végétarien, mais incluant occasionnellement de la viande ou du poisson.

Gazéification (ou pyrogazéification) : procédé de traitement thermochimique de matières organiques non fermentescibles ou de déchets carbonés non recyclables par chauffage à des températures comprises généralement entre 900 °C et 1 200 °C en présence d'une faible quantité d'oxygène pour la production d'un gaz de synthèse (appelé syngas).

Géocooling : rafraîchissement par un fluide caloporteur directement tempéré par le sol.

Internet des objets (IOT en anglais) : infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels), grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables, existantes ou en évolution (source : Union internationale des télécommunications).

***Liquid Organic Hydrogen Carrier* (LOHC)** : liquide ayant une densité de stockage d'hydrogène élevée, permettant une manipulation sûre de l'hydrogène.

Méthanation : procédé industriel consistant à faire réagir du dioxyde de carbone (CO_2) ou du monoxyde de carbone (CO) avec de l'hydrogène afin de produire du méthane (CH_4).

MTO (*Methanol-to-olefins*) : procédé de synthèse d'hydrocarbures oléfiniques à partir du méthanol.

NIMBY (*Not in My Backyard*) : (littéralement « pas dans mon jardin ») attitude d'une personne ou d'un groupe de personnes qui refuse l'implantation d'une infrastructure dans son environnement proche.

Pilotabilité du système électrique : capacité à moduler l'offre pour la faire coïncider avec la demande.

Power-to-gas : transformation de l'électricité en gaz (hydrogène ou méthane) injecté dans les réseaux par électrolyse de l'eau puis, le cas échéant, par méthanation.

Power-to-liquid : transformation de l'électricité en liquide (kerozène, gazole…).

***Power Usage Effectiveness* (PUE)** : indicateur de mesure de l'efficacité énergétique d'un data center. Il est calculé en divisant le total de l'énergie consommée par le data center par le total de l'énergie utilisée par les équipements informatiques (serveur, stockage, réseau).

Produit biosourcé : produit partiellement ou totalement issu de biomasse (norme NF-EN-16575, Produits biosourcés – vocabulaire). Les produits biosourcés sont destinés à de nombreux secteurs d'application : alimentation, énergie, chimie, matériaux traditionnels (bois d'œuvre) ou innovants (composites…).

Produits blancs : appareils électroménagers produisant du froid, mais aussi les sèche-linge, les lave-vaisselle et les lave-linge.

Projet alimentaire territorial : diagnostic partagé faisant un état des lieux de la production agricole et alimentaire locale, du besoin alimentaire du bassin de vie et identifiant les atouts et contraintes socio-économiques et environnementales du territoire.

Stacks : empilement des cellules élémentaires d'électrolyse.

Syngas : gaz de synthèse produit par traitement thermochimique de matières organiques non fermentescibles (biomasse lignocellulosique sèche : bois, bois déchets, pailles…) ou de déchets carbonés non recyclables, notamment des combustibles solides de récupération (CSR). Le syngas est composé principalement d'hydrogène, de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone et, dans une moindre mesure, de méthane et de diazote.

Vaporeformage : procédé de production de l'hydrogène basé sur la dissociation de molécules carbonées (méthane, etc.) en présence de vapeur d'eau et de chaleur.

***Vehicle-to-grid* (V2G)** : système où des véhicules électriques rechargeables, tels que les véhicules électriques à batterie (BEV), les véhicules hybrides rechargeables (PHEV) ou les véhicules électriques à pile à combustible à hydrogène (FCEV) peuvent se recharger, mais peuvent aussi redistribuer leur énergie électrique dans le réseau ou le domicile du propriétaire.

Ce document est édité par l'ADEME.

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Retrouvez les scénarios ADEME en ligne sur www.transitions2050.ademe.fr

Crédits photo : ADEME (Isabelle Feix, Bernard Martelly, Julien Thual, Christian Weiss), Leitenberger/ADEME, Getty Images, NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS and U.S./Japan ASTER Science Team, Shutterstock (Juice Flair, Pisa Photography, LianeM, Matchou), Unsplash

Illustrations : Stéphane Kiehl

Conception éditoriale et graphique : bearideas

Coordination communication ADEME : Céline Nowak

www.ademe.fr

Brochure réf. 011627

ISBN : 979-10-297-1887-8 – novembre 2021

Dépôt légal : © ADEME Éditions, novembre 2021

Merci de n'imprimer ce document que si nécessaire.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

RAPPORT TRANSITION(S) 2050

« **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » est une prospective qui peint quatre chemins cohérents et contrastés pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050. Ils visent à articuler les dimensions technico-économiques avec des réflexions sur les transformations de la société qu'elles supposent ou qu'elles suscitent.

Les secteurs suivants y sont détaillés : ceux qui relèvent de la consommation (l'aménagement du territoire, le bâtiment, la mobilité et l'alimentation) ; ceux qui constituent le système productif (l'agriculture, l'exploitation des forêts et l'industrie), ceux qui forment l'offre d'énergie (le gaz, le froid et la chaleur, la biomasse, les carburants liquides et l'hydrogène) ; ceux qui constituent des ressources (la biomasse et les déchets) et les puits de carbone. Ces secteurs sont également analysés au regard de leurs impacts, lorsque cela a été possible, sur l'eau, les sols, les matériaux et la qualité de l'air.

Cet ouvrage est le résultat d'un travail de plus de deux ans mené par l'ADEME, en interaction avec des partenaires extérieurs, afin d'éclairer les décisions à prendre dans les années à venir. Car le but n'est pas de proposer un projet politique ni « la » bonne trajectoire, mais de rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et environnementales afin de faire prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qu'entraîneront les chemins qui seront choisis.

011627

www.transitions2050.ademe.fr

9 791029 718878