



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

Actualisation des analyses sectorielles du rapport du CGEDD n° 008378-01 de février 2013 relatif à la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050

Rapport n° 008378-02
établi par

Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF (coordonnateur), Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT

Février 2017



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction de ce rapport.

Sommaire

Résumé.....	3
Introduction.....	7
1.1. Le facteur 4, un objectif de diminution des émissions de gaz à effet de serre à échéance 2050.....	7
1.2. Un premier rapport en 2013 du ministère de l'environnement sur ce sujet.....	7
1.3. Une actualisation du rapport de 2013 pour contribuer à la stratégie nationale prévue dans l'Accord de Paris.....	8
1.4. Contenu du rapport.....	8
1. État des lieux.....	10
1.1. Évolutions marquantes depuis 2013 du contexte de la lutte contre l'effet de serre...	10
1.1.1. <i>Bas prix de l'énergie fossile, baisse des prix des énergies renouvelables, difficultés des sociétés productrices d'énergie.....</i>	10
1.1.2. <i>Nécessaire cohérence avec d'autres préoccupations environnementales.....</i>	11
1.1.3. <i>Evolution des perceptions sociales.....</i>	11
1.1.4. <i>Soutien à la recherche et au développement en matière d'énergie.....</i>	12
1.2. Engagements, objectifs et projections.....	13
1.2.1. <i>Des engagements mondiaux consensuels mais non contraignants.....</i>	13
1.2.2. <i>Des engagements européens volontaristes.....</i>	14
1.2.3. <i>Des engagements nationaux incluant le « facteur 4 ».....</i>	15
1.2.4. <i>Des scénarios pour aboutir à l'objectif recherché.....</i>	17
1.2.5. <i>Une répartition des efforts entre secteurs ciblant le bâtiment.....</i>	19
1.2.6. <i>Synthèse sur les contraintes et objectifs.....</i>	19
1.3. L'évolution des températures et des émissions de GES.....	21
1.3.1. <i>Données passées de températures et d'émissions de GES.....</i>	21
1.3.2. <i>L'évolution dans le futur des émissions de GES en France.....</i>	24
1.3.3. <i>Sensibilité des scénarios.....</i>	25
1.3.4. <i>Incertitudes sur les émissions mondiales de GES et les températures.....</i>	26
1.3.5. <i>Constat provisoire.....</i>	27
2. Les évolutions par grand secteur.....	30
2.1. Agriculture et UTCF.....	30
2.1.1. <i>Un développement des connaissances.....</i>	30
2.1.2. <i>Des règles de comptabilisation qui ont progressé.....</i>	31
2.1.3. <i>Des évolutions récentes.....</i>	31
2.1.4. <i>Une difficulté majeure à dépasser le facteur 2 en agriculture et sylviculture. .</i>	33
2.2. Le bâtiment.....	33
2.2.1. <i>Un secteur clef pour diminuer les émissions de GES.....</i>	33
2.2.2. <i>La rénovation des bâtiments existants.....</i>	34
2.2.3. <i>Les bâtiments neufs.....</i>	36
2.2.4. <i>Nécessité d'une stratégie sous-tendue par la réduction observée des émissions.....</i>	37

2.3. L'énergie.....	37
2.3.1. La production d'électricité.....	38
2.3.2. Le développement des EnR électriques et thermiques.....	38
2.3.3. Des progrès possibles grâce à des réseaux intelligents.....	39
2.3.4. Adaptation de et à la demande.....	40
2.4. L'industrie.....	40
2.5. Les transports.....	42
2.5.1. Une grande inertie du secteur.....	42
2.5.2. Leviers.....	42
2.5.3. Deux sujets clés.....	45
3. Les problématiques transversales.....	47
3.1. De nombreuses interactions entre les secteurs.....	47
3.2. La R&D.....	48
3.3. L'économie circulaire.....	49
3.4. Le développement des produits biosourcés.....	49
3.5. L'énergie 2.0.....	50
3.6. L'artificialisation des territoires.....	51
3.7. Comportements.....	51
Conclusion.....	53
Annexes.....	55
Annexes en volumes séparés.....	57
Annexes jointes.....	59
1. Note de commande.....	60
2. Les formats des rapports d'inventaires d'émissions.....	62
2.1. Des périmètres et hypothèses diverses.....	62
2.2. La prise en compte de l'UTCF réduit en général les valeurs d'émissions.....	63
2.3. Les facteurs d'émission sont incertains et actualisés.....	63
2.4. Autres éléments de variabilité.....	65
2.5. Exemple de dispersion des données pour les émissions récentes et de référence.....	65
3. Commentaires sur les 33 recommandations de 2013.....	67
4. Commentaires sur les 12 points-clés de 2013.....	78
5. Liste des personnes rencontrées.....	88
6. Glossaire des sigles et acronymes.....	90

Résumé

Le présent rapport procède à une actualisation du rapport du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) en date de février 2013, intitulé « le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050 ».

La plupart des observations du rapport de 2013 restent valables, compte tenu de l'inertie des émissions à l'échelle d'un pays.

Le contexte a cependant changé et semble plus favorable : loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), stratégie nationale bas carbone (SNBC) et programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) en France, Accord de Paris au niveau international, baisse constatée des coûts de production de l'électricité d'origine photovoltaïque et des batteries, sensibilisation accrue des populations aux problématiques climatiques et à la nécessité d'un prix du carbone reflétant l'impact négatif des émissions de GES.

Les difficultés subsistent cependant. La fiabilité et la facilité d'utilisation des données d'émissions de GES sont améliorables. Les scénarios de réduction des émissions restent fragiles, notamment face à des ruptures (par exemple variations importantes du prix des énergies). La détermination de l'échelle pertinente en matière d'action et de gouvernance est délicate. De manière générale, l'atteinte du facteur 4 repose à ce stade sur des hypothèses nécessitant une amélioration des signaux prix, des progrès technologiques, des obligations réglementaires, et des comportements différents.

L'approche sectorielle est de plus réductrice face à certains sujets comme l'autoproduction d'électricité -ou le véhicule électrique- qui ressortissent aux domaines bâtiment, énergie -et transports, ou les sujets transversaux comme les comportements ou les développements intégrés à l'échelle locale.

L'analyse secteur par secteur souligne plusieurs limitations dans la réduction des émissions de GES. L'agriculture reste difficile à décarboner et un progrès des connaissances (sols, UTCF) demeure nécessaire. Le secteur du bâtiment est très en retard par rapport aux ambitions affichées en matière de rénovation, souffre de l'insuffisance de données fiables sur l'effet des rénovations effectuées et nécessite un accompagnement de proximité voire quelques obligations pour les acteurs importants afin de déclencher l'acte de rénover. En matière de production d'énergie, le déploiement des énergies renouvelables intermittentes/déconcentrées ou des nouveaux vecteurs énergétiques n'est pas aisé et pose la question des réseaux intelligents, pour piloter le stockage, l'effacement, la stabilisation, et la sécurité. L'industrie doit évoluer vers encore plus d'efficacité grâce à l'économie circulaire et travailler sur le stockage du carbone. Les transports, gros émetteurs de GES, sont un secteur qui évolue lentement. Ils peuvent diminuer leurs émissions grâce à une meilleure efficacité énergétique, des sources d'énergies moins carbonées reposant sur l'électrification, les carburants alternatifs issus de biomasse ou l'hydrogène, voire de nouvelles formes de mobilités permises notamment par les techniques de l'information et de la communication.

La diminution des émissions d'un facteur 4 en 2050 par rapport à 1990 reste donc délicate, suppose des décisions et de la continuité tant au niveau de l'État et des collectivités que des acteurs économiques et individuels et n'est pas garantie. L'essentiel des efforts reste encore à faire.

Liste des recommandations

1. **Piloter la transition énergétique en donnant une plus grande importance à la réduction des émissions de GES.....20**
2. **Prendre en compte, dans les approches sectorielles ou transversales, l'énergie grise et le carbone gris utilisés dans le cycle de vie.....28**
3. **Fiabiliser, rationaliser, harmoniser et simplifier les données et indicateurs relatifs au climat ainsi que leur accès, pour une meilleure connaissance et compréhension par les décideurs et le public; ces indicateurs ne doivent pas uniquement être des valeurs instantanées, certains doivent permettre de visualiser l'urgence et la faisabilité de transformations longues à mettre en œuvre (cas de la décarbonation de l'industrie); ces indicateurs ne doivent pas se limiter aux émissions mais aussi couvrir l'empreinte et le cycle de vie.....29**
4. **Développer les connaissances sur les conséquences des changements d'affectation des terres, la gestion optimale des forêts du point de vue des émissions de GES, les bilans d'absorption ou émissions forestières et notamment de la forêt guyanaise.....31**
5. **Relancer la rénovation des logements existants par un accompagnement local individualisé technique, financier et pédagogique en ayant une démarche cohérente avec les perspectives de rénovation ultérieure et environnantes. Mieux apprécier la réalité des rénovations et prendre en compte le cycle de vie.....35**
6. **Mieux impliquer les propriétaires de patrimoines importants (État et ses établissements publics, Collectivités locales, Sociétés propriétaires de surfaces commerciales, entrepôts, hôtels, logements) dans des politiques de rénovation en leur fixant des objectifs de résultat.....36**
7. **Préciser les conditions techniques, réglementaires, juridiques, économiques et fiscales de l'auto-production et auto-consommation d'énergie, notamment dans le contexte de l'émergence des énergies renouvelables intermittentes et des problématiques de stabilité et de sécurité des réseaux, et dans le cadre de la généralisation des bâtiments à énergie positive prévue dans la réglementation relative aux bâtiments, et lancer des expérimentations correctement suivies.....40**
8. **Promouvoir la R&D, l'évaluation du potentiel et de l'acceptabilité, l'expérimentation, les pistes de facilitation économique et la pédagogie en matière de technologies décarbonées, notamment l'usage efficient des ressources, l'hydrogène et la capture et séquestration et l'utilisation du dioxyde de carbone, en utilisant notamment les possibilités offertes par le futur fonds démonstrateur européen.....41**

- 9.Généraliser une réglementation des émissions des GES des véhicules s'appuyant sur des mesures représentatives de leurs conditions d'utilisation et en intégrant les émissions survenant dans la phase de construction/déconstruction. Adopter un niveau d'ambition élevé pour la réduction des émissions unitaires.....44**
- 10.Développer la décarbonation des transports, notamment par maîtrise de la demande, fiabilisation des mesures et contrôles d'émission y compris lors du cycle de vie, électrification (incitations à l'acquisition de tels véhicules et réalisations d'infrastructures de recharge accessibles et intelligentes), et, s'ils s'avèrent avoir un bilan positif en matière d'émissions de GES, par l'utilisation des biocarburants liquides ou gazeux de seconde ou troisième génération.....46**
- 11.Promouvoir de nouvelles formes de mobilité efficaces et faiblement émissives en milieu urbain, en s'appuyant, si leur impact favorable est avéré, sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication.....46**
- 12.Renforcer la pédagogie en matière de : efficacité énergétique et sobriété ; lien entre consommation, processus, émissions et changement climatique ; déploiement des énergies renouvelables électriques (photovoltaïque, éolien...) et thermiques (biomasse, réseaux de chaleur, récupération...) ; possibilités d'agir au quotidien par changement de comportement ou passage à l'acte (transport sobre, rénovation, achat,...) ; etc.....52**

Introduction

1.1. Le facteur 4, un objectif de diminution des émissions de gaz à effet de serre à échéance 2050

L'influence des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) sur l'évolution du climat, documentée par les travaux du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), est aujourd'hui largement reconnue.

Les projections climatiques conduisent à rechercher en 2050 une diminution des émissions d'un facteur 2 à 3 environ à l'échelle de la planète par rapport à leur niveau de 1990 pour ne pas dépasser en 2100 une élévation moyenne de température de 2°C à la surface du globe¹.

Partant du principe que cette réduction ne pouvait être uniforme entre les pays développés qui émettaient beaucoup et les pays moins avancés qui aspiraient à augmenter leur niveau de vie, la France a retenu l'objectif d'un objectif de réduction de ses émissions deux fois plus important que la réduction moyenne, soit une réduction d'un facteur 4.

Ce facteur 4, inscrit dans la loi française depuis 2005, est rappelé dans l'article 1 de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)².

Cette approche portant sur les flux est complétée par une approche portant sur les stocks. Pour ne pas dépasser un réchauffement moyen de 2°C par rapport au début de l'ère industrielle (ou encore environ 1,15°C par rapport à 2012), le dernier rapport du GIEC estime que les émissions cumulées ne devraient pas dépasser 2900 GtCO₂éq (fourchette 2550-3150), sachant que ce stock s'élevait à environ 1950 GtCO₂éq en 2011 et s'accroît de 3 % par an. Aux rythmes actuels d'émission, pour limiter le réchauffement moyen à 2°C et si possible à 1,5°C, il faudrait donc en quelques décennies atteindre un système mondial à émission nulle ou négative.

1.2. Un premier rapport en 2013 du ministère de l'environnement sur ce sujet

En février 2013, le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), qui dépend du ministère en charge de l'environnement, a publié un premier rapport sur ce sujet intitulé « Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050³ » dans le but de préparer le débat national sur la transition énergétique prévu pour 2013 et la loi qui devait le suivre.

¹ Le 5^e rapport du GIEC indique que les scénarios susceptibles de « probablement » (probabilité 66 à 100%) limiter la hausse des températures à 2°C font état de réductions d'émissions de 40 à 70 %

² Art 1 III – La politique énergétique nationale a pour objectifs :
« 1° De réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. »

³ Publié à la Documentation française, voir <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/134000245/>

Cet ouvrage souligne la difficulté de parvenir en 2050 au « facteur 4 ». Le respect par la France de ses engagements pris au titre du protocole de Kyoto ne doit pas faire illusion. Le rythme des réductions d'émissions à prévoir sur la période 2030-2050 est sans commune mesure avec le rythme des efforts actuels. Pour parvenir à des diminutions significatives d'émissions de GES, il est nécessaire d'introduire des incitations économiques via un prix du carbone, de s'intéresser aux comportements y compris dans le contexte de politiques publiques, de mieux observer les progrès accomplis, d'introduire des obligations de rénovation des bâtiments existants, de limiter les émissions des transports en faisant évoluer les motorisations et les pratiques, de déployer dès aujourd'hui pour la production d'électricité des énergies renouvelables, enfin d'avoir davantage recours à la biomasse pour la chaleur.

Le présent rapport constitue une actualisation de ces réflexions à la lumière des évolutions qui ont eu lieu ces quatre dernières années, notamment la LTECV, la stratégie nationale bas carbone (SNBC), et l'Accord de Paris⁴.

1.3. Une actualisation du rapport de 2013 pour contribuer à la stratégie nationale prévue dans l'Accord de Paris

Cette actualisation est prévue dans le programme de travail 2016-2017 du CGEDD et a donné lieu à la note de commande qui figure en annexe 1. Elle s'inscrit dans le cadre plus général de la priorité donnée au sein du ministère en charge de l'environnement à la mise en œuvre de l'Accord de Paris.

La mission a été attribuée début avril 2016 à MM. Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF, Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT, ingénieurs généraux des ponts, des eaux et des forêts.

Le présent rapport met en exergue les tendances récentes en matière d'émissions de GES ainsi qu'en matière d'actions et de solutions technologiques permettant de les réduire. Il évoque la prise en compte des recommandations du rapport précédent et leur pertinence aujourd'hui. Face au risque de non atteinte du facteur 4 en 2050, il souligne enfin les points paraissant cruciaux dans les années à venir pour la réussite d'une politique de lutte contre les émissions de GES.

1.4. Contenu du rapport

Le rapport se compose :

- d'un document principal d'environ 40 pages ;
- d'annexes constituées de la note de commande, de la liste des personnes rencontrées et d'un glossaire ;
- d'annexes transversales sur le parangonnage (dans un volume séparé), les formats de rapportage, la suite des recommandations formulées par le rapport de 2013 (dans le même volume que le rapport principal) ;

⁴ Mais aussi les réformes territoriales récentes : notamment loi n°2014-58 relative à la Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles, ou loi n°2015-991 portant Nouvelle organisation territoriale de la république

- d'annexes relatives aux secteurs d'activité « agriculture et utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCf) », bâtiment, énergie, industrie, transports, présentées sous forme de volumes séparés en raison de leur taille.

1. État des lieux

1.1. Évolutions marquantes depuis 2013 du contexte de la lutte contre l'effet de serre

Les engagements en matière de réduction des émissions de GES s'inscrivent dans un contexte notamment marqué par les évolutions suivantes :

1.1.1. Bas prix de l'énergie fossile, baisse des prix des énergies renouvelables, difficultés des sociétés productrices d'énergie

Le ralentissement de la croissance des économies des pays en développement, en particulier de la Chine, n'a pas été compensé par une reprise de l'économie des pays développés. La croissance mondiale avoisine 2,5 % depuis 2012, alors qu'elle était de 4,5 % en 2010⁵. Corrélativement, les prix de l'énergie fossile ont été bas depuis fin 2014⁶, entraînant en France une augmentation de leur consommation dans un secteur comme les transports⁷ et décourageant les investissements dans les énergies alternatives, les économies d'énergie mais aussi l'exploration pétrolière et gazière, malgré des taux d'intérêt historiquement bas. Les prix de l'électricité sur les marchés de gros ont également fortement baissé⁸. Par contre, en France, la consommation d'énergie primaire et finale est stabilisée depuis les années 2000-2005⁹.

La période récente s'est caractérisée par des baisses importantes des coûts de l'électricité produite par des énergies renouvelables, qu'il s'agisse de l'éolien ou du photovoltaïque¹⁰. Des hausses de performance et baisses de coût se poursuivent de même dans le secteur du stockage d'électricité (batteries)¹¹. En revanche, le coût de l'électricité d'origine nucléaire est en hausse, du fait de nouvelles exigences de

⁵ Voir <http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>

⁶ Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Historique-du-cours-du-Brent-date.html>

⁷ Voir http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?ref_id=NATnon11329

⁸ du fait de la baisse des prix des combustibles fossiles et de l'interaction mal maîtrisée entre les règles de fonctionnement de ces marchés et les incitations à la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables

⁹ Voir par exemple les « Chiffres clés de l'énergie », édition 2016, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2669/966/chiffres-cles-lenergie-edition-2016.html>

¹⁰ Voir <https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2015/7279-proj-costs-electricity-2015-es.pdf> pour des prix de production. Des prix de 70€/MWh sont observés en appel d'offre en 2016 contre des prix trois fois supérieurs en 2011. Le photovoltaïque génère même maintenant de l'électricité à moins de 3c par kWh à Dubai <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/record-du-monde-de-competitivite-du-solaire-pv-26-centimes-le-kwh-a-dubai-33695/>

¹¹ Voir http://www.observatoire-energies-entreprises.fr/wp-content/uploads/2016/07/Presentation_JM_Tarascon_16juin2016.pdf baisse annoncée de 350 à 150 €/kWh en 2020. Les prix dépendent des filières mais entre 2011 et 2016, pour les batteries lithium-ion, on peut estimer des baisses de prix de moitié, cf <http://www.ecoco2.com/blog/11943-batteries-lithium-ion-la-chute-des-prix-saccentue>

sécurité des installations, prises en compte soit dans la mise à niveau des réacteurs actuels soit dans la conception de nouveaux réacteurs¹².

Le contexte économique a enfin été marqué par les difficultés des producteurs d'électricité européens du fait des bas prix de gros de l'électricité sur le marché, souvent inférieurs à leurs coûts de production¹³. Les prix de l'électricité livrée au détail ne suivent pas cette baisse, du fait de la hausse des coûts des réseaux, du soutien aux énergies renouvelables imputés sur le prix de l'électricité vendue au consommateur final¹⁴ et du maintien des tarifs régulés pour les particuliers.

1.1.2. Nécessaire cohérence avec d'autres préoccupations environnementales

La nécessité d'un arbitrage entre préoccupations climatiques et qualité de l'air sont connues dans le domaine des transports. Les motorisations diesel émettent moins de GES que les motorisations essence au km parcouru, mais beaucoup plus d'oxydes d'azote et de particules fines nocives pour la santé.

Un autre conflit classique a trait à l'implantation des énergies renouvelables que sont les éoliennes (impact sur les paysages, l'avifaune et les chiroptères ou encombrement des voies de circulation maritimes), les panneaux photovoltaïques (espace occupé), les méthaniseurs (odeur et sécurité), les centrales hydroélectriques (continuité écologique).

1.1.3. Evolution des perceptions sociales

L'Accord de Paris de décembre 2015 reste encourageant malgré les inquiétudes liées au changement d'administration américaine en 2016, et a une nouvelle fois sensibilisé davantage le public à la réalité et aux conséquences du changement climatique. Le public semble préférer un accord international à une action individuelle pour lutter contre l'effet de serre¹⁵ malgré des actions pédagogiques ou d'animation¹⁶. La sensibilité à l'économie circulaire (recyclage, utilisation de matériaux bio-sourcés, prise en compte du cycle de vie, économie du partage) et la formation y compris professionnelle progressent, avec des impacts positifs sur la lutte contre le changement climatique.

¹² La production de Hinkley point sera achetée à 110€/kWh Voir http://www.challenges.fr/entreprise/energie/le-veritable-argument-en-faveur-d-hinkley-point_415168

¹³ Cette anomalie s'explique par la mise sur ce marché d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables, dont le prix d'achat est par ailleurs garanti. Les prix « futures » ont ainsi évolué de 40,9 €/MWh fin 2014 à 33,5 €/MWh pour 2017.

¹⁴ Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Sortie-du-rapport-Panorama.48520.html> fiche 12

¹⁵ Voir <http://ve.lecese.fr/sondage-vivre-ensemble-le-changement-climatique/>

¹⁶ Par exemple <http://www.education.gouv.fr/cid93588/la-semaine-climat.html>. Elle a eu lieu en 2016 du 10 au 15 octobre.

1.1.4. Soutien à la recherche et au développement en matière d'énergie

La recherche et développement a été active en France ces quatre dernières années dans les domaines de la production d'énergie et des utilisations de l'énergie. Les soutiens publics à la recherche ont dépassé le milliard d'euros, privilégiant à part sensiblement égale les nouvelles technologies de l'énergie, dont l'illustration ci-dessous donne un aperçu, et l'énergie nucléaire.

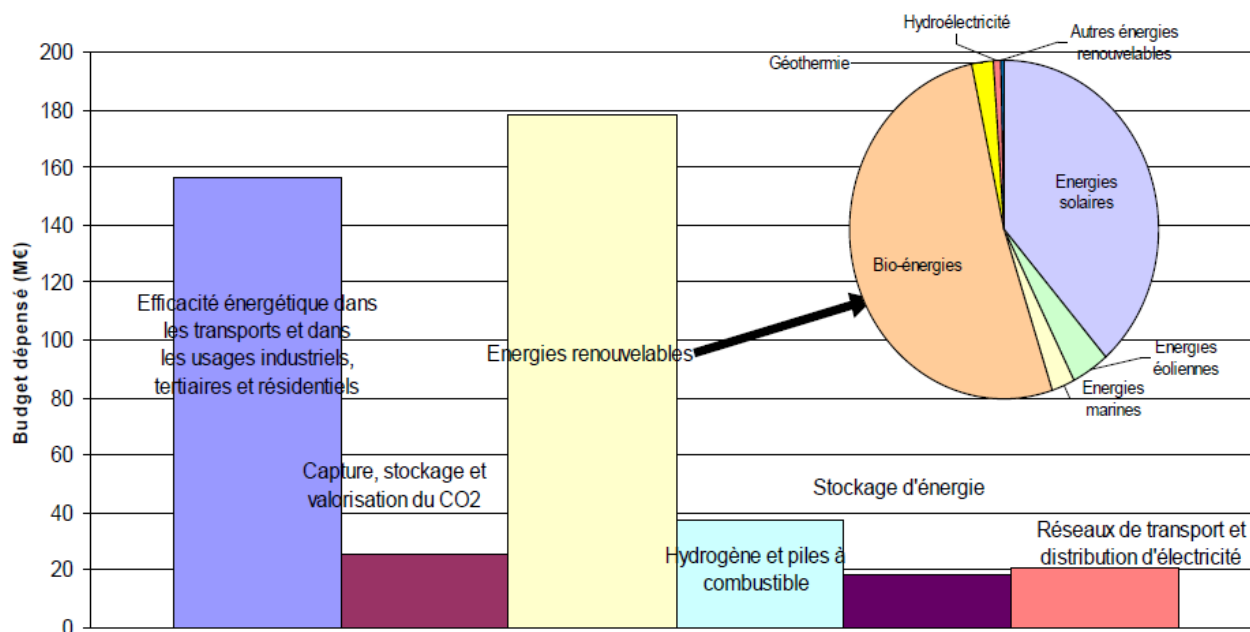


Figure 1 : Subventions à la R&D des nouvelles technologies de l'énergie en 2014 en France – Source CGDD, cité dans le panorama énergies climat édition 2016 de la DGE¹⁷

La stratégie nationale de recherche pour l'énergie (SNRE) correspond, comme le précise la LTECV, au volet énergie de la stratégie nationale de recherche, élaborée avec le concours de l'alliance Ancre¹⁸. Le programme des investissements d'avenir a permis de soutenir le développement, qui avait auparavant des difficultés à trouver des financements.

¹⁷ Voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/07_-_Developper_les_technologies_pour_le_systeme_energetique_de_demain.pdf. Les tendances récentes des soutiens aux nouvelles technologies de l'énergie y apparaissent en forte croissance depuis 2004 avec un pic en 2011 puis une stabilisation ensuite au niveau de 2009

¹⁸ Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie

1.2. Engagements, objectifs et projections

La lutte contre le changement climatique fait partie, avec la préservation de la biodiversité, des priorités mondiales en matière d'environnement et de développement durable. Les deux phénomènes sont liés, le changement climatique s'ajoutant aux menaces qui pèsent sur la biodiversité. Ceci explique les nombreuses initiatives et engagements pris dans ce domaine, au niveau mondial, européen et français.

1.2.1. Des engagements mondiaux consensuels mais non contraignants

Au niveau mondial, l'accord de Paris¹⁹, adopté le 12 décembre 2015 à l'issue de la 21^{ème} conférence des parties (COP 21²⁰) de la convention-cadre des Nations-Unies sur le changement climatique (CCNUCC), est entré en vigueur le 4 novembre 2016, conséquence de sa ratification par plus de 55 pays représentant plus de 55 % des émissions. Il vise à maintenir le réchauffement en dessous de 2°C (voire 1,5°C) grâce à des contributions nationales des pays signataires révisées tous les cinq ans. Il a été salué comme le premier accord climatique réunissant la communauté internationale dans son ensemble. De plus, grâce au rôle des acteurs non étatiques, qui participent à l'« agenda des solutions » ou plan d'action Lima-Paris²¹, de nombreux engagements ont été pris par les collectivités territoriales et le monde industriel. Lors de la COP22 qui a suivi en novembre 2016 à Marrakech, la France s'est engagée à atteindre la « neutralité carbone »²² en 2050.

Les émissions du secteur aérien et du secteur maritime international, qui représentent chacune environ 2 % des émissions mondiales, ne sont pas visées par l'Accord de Paris. L'organisation de l'aviation civile internationale²³ (OACI) s'est engagée le 6 octobre 2016 à Montréal à compenser la part des émissions située au-delà du seuil des émissions atteint en 2020 par des crédits carbone, sur une base volontaire correspondant actuellement à 80 % des émissions. L'organisation maritime internationale²⁴ (OMI) a adopté le 28 octobre 2016 un enregistrement et une notification obligatoire des consommations de carburants par les navires, préalable à l'adoption d'une stratégie en 2018.

Enfin, dans le cadre d'un amendement du protocole de Montréal, la communauté internationale a décidé le plafonnement puis la diminution des hydrofluorocarbures (HFC, dont le pouvoir de réchauffement global peut être plus de 10 000 fois celui du CO₂) le 15 octobre 2016 à Kigali, avec des efforts différenciés entre pays développés

¹⁹ Voir http://unfccc.int/portal_francoophone/items/3072.php

²⁰ Suivie du 7 au 18 novembre 2016 par la COP22 de Marrakech, au cours de laquelle la France s'est engagée à atteindre la « neutralité carbone » (bilan d'émissions et d'absorptions nul) en 2050

²¹ Voir <http://newsroom.unfccc.int/lpaa-fr/cop-21/>

²² c'est à dire que les émissions de GES, basses, seront compensées dans des conditions qui restent à déterminer, par exemple par les puits de carbone de l'UTCF, le stockage souterrain CO₂ ou des crédits internationaux

²³ Voir <http://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/Historic-agreement-reached-to-mitigate-international-aviation-emissions.aspx>

²⁴ Voir <http://www.imo.org/fr/MediaCentre/PressBriefings/Pages/11-data-collection-.aspx>

et en développement²⁵. L'enjeu de cette réduction de l'emploi des HFC correspond à une diminution moyenne de la température de 0,5°C à la fin du siècle.

1.2.2. Des engagements européens volontaristes

L'Union européenne (UE) avait décidé en 2007 un premier paquet énergie-climat (dit « 2020 »)²⁶ prévoyant pour 2020 une diminution des émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport à 1990, une part d'énergies renouvelables de 20 %²⁷ et une amélioration de l'efficacité énergétique de 20 %.

Pour mettre en œuvre sa politique de diminution des émissions de GES, l'Union européenne²⁸ a créé un système d'échanges de quotas d'émissions (SEQUE, en anglais *emission trading scheme* - ETS), auquel sont soumis les plus gros émetteurs européens, notamment les énergéticiens, les industriels (ciment, chimie, sidérurgie...) et les transporteurs aériens, représentant 45 % des émissions européennes. Ce système fonctionne mal en raison des prix bas (typiquement 5€/tCO₂) des quotas consécutifs à des sur-allocations.

Les progrès en matière d'efficacité énergétique reposent en particulier sur la mise en œuvre de la directive efficacité énergétique²⁹, qui prévoit un ensemble de mesures allant des audits énergétiques à la prise en compte de cet objectif dans la commande publique.

L'UE a décidé lors du conseil européen d'octobre 2014 un nouveau paquet « énergie climat 2030 »³⁰ en retenant une diminution contraignante de 40 % de ses émissions de GES entre 1990 et 2030, un objectif³¹ de 27 % d'énergie finale renouvelable en 2030 et une amélioration indicative de l'efficacité énergétique de 27 %. Elle a publié le 15 juillet 2015 une proposition de révision de la directive portant sur le marché carbone européen (ETS) et le 20 juillet 2016 des projets de règlements concernant la répartition de l'effort entre les États membres³² pour les secteurs non compris dans le marché carbone européen (ESR), ainsi que les modalités relatives au secteur des terres (LULUCF).

Les entreprises soumises au SEQUE devront globalement réduire leurs émissions de GES de 43 %. Celles qui n'y sont pas soumises devront globalement respecter des réductions moyennes déterminées par pays (30 % en moyenne et 37 % en France

²⁵ Les pays développés diminueront leur consommation de ces substances, 14 000 fois plus nocives pour le réchauffement à masse égale que le CO₂, de 10 % d'ici 2019 et de 85 % d'ici 2036. Les pays en voie de développement, divisés en deux groupes, commenceront leurs efforts de réduction en 2024 et devront avoir atteint des pourcentages de réduction de 80 à 85 % en 2045 et 2047.

²⁶ Voir http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_fr.htm

²⁷ La France a un objectif de 23 %

²⁸ Pour plus de détails voir annexe « Parangonnage international UE, Royaume-Uni, Allemagne, Californie, Chine »

²⁹ Voir <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32012L0027>

³⁰ Voir http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_fr.htm

³¹ Contraignant au niveau de l'UE mais non décliné au niveau des États membres

³² Le 19 décembre 2016 a été examiné par le conseil environnement européen l'état d'avancement de cette proposition de règlement

dans la proposition de la Commission). L'UE a décidé parallèlement d'améliorer le fonctionnement du SEQE en stabilisant le prix des quotas à un niveau suffisant³³.

La nouvelle politique agricole commune³⁴ (PAC), adoptée fin 2013, prend en revanche relativement peu en compte le changement climatique. Les pays sont certes tenus de consacrer 30 % des aides à l'« écologisation », mais la seule exigence de la PAC directement en relation avec la limitation des GES est le maintien des prairies permanentes, qui a également des effets très positifs sur la qualité des nappes souterraines.

La Commission européenne a publié en 2011 une feuille de route vers une économie à faible intensité de carbone³⁵, prévoyant au-delà de 2030 une diminution de 60 % des émissions de GES en 2040 puis une diminution de 80 % à 95 % en 2050. Tous les grands secteurs sont censés participer à ces réductions, avec toutefois des pourcentages de réduction différents selon les secteurs.

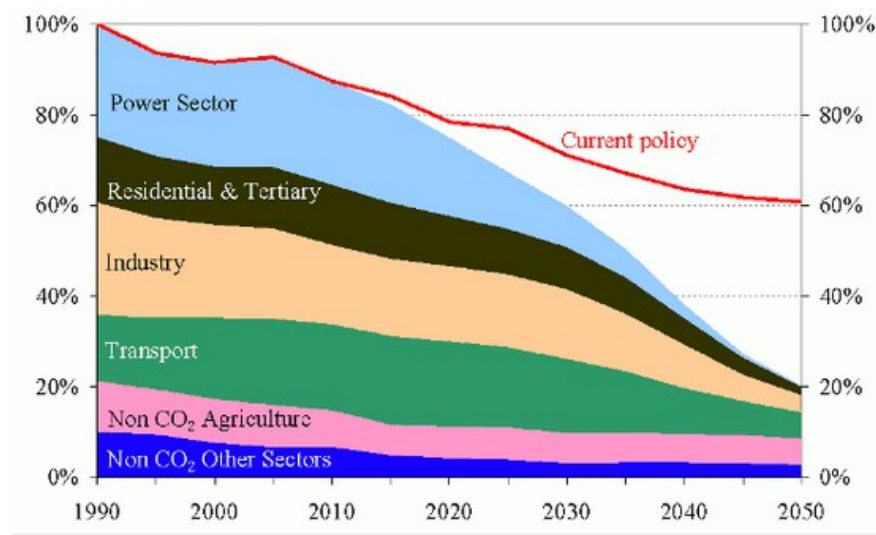


Figure 2 : Réduction possible des émissions de GES dans l'UE – Source : Feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050, 8 mars 2011, site Commission européenne. NB : Les mesures du paquet énergie climat 2030 rapprochent la courbe rouge des « politiques actuelles » des évolutions souhaitées

1.2.3. Des engagements nationaux incluant le « facteur 4 »

La France a réaffirmé dans la LTECV³⁶ son objectif de diminution des GES de 40 % en 2030 et de 75 % (facteur 4) en 2050 par rapport à 1990. Corrélativement, le pourcentage d'énergies renouvelables doit être de 23 % en 2020 et de 32 % en 2030.

³³ Notamment par retrait progressif des quotas en excès et/ou suppression de quotas dans la réserve de stabilité du marché

³⁴ Voir http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-13-937_fr.htm

³⁵ Voir Feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050, 8 mars 2011, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:fr:PDF>

³⁶ Voir <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031044385&categorieLien=id> art 1

Enfin, la consommation énergétique finale doit être diminuée de 50 % entre 2012 et 2050, en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030.

La stratégie nationale bas carbone³⁷ (SNBC), la programmation pluriannuelle de l'énergie³⁸ (PPE), la stratégie de mobilité durable³⁹ déclinent ces objectifs. La SNBC détermine des budgets carbone, ventilés de manière indicative par secteurs d'activité, pour trois périodes 2015-2018, 2019-2023 et 2024-2028.

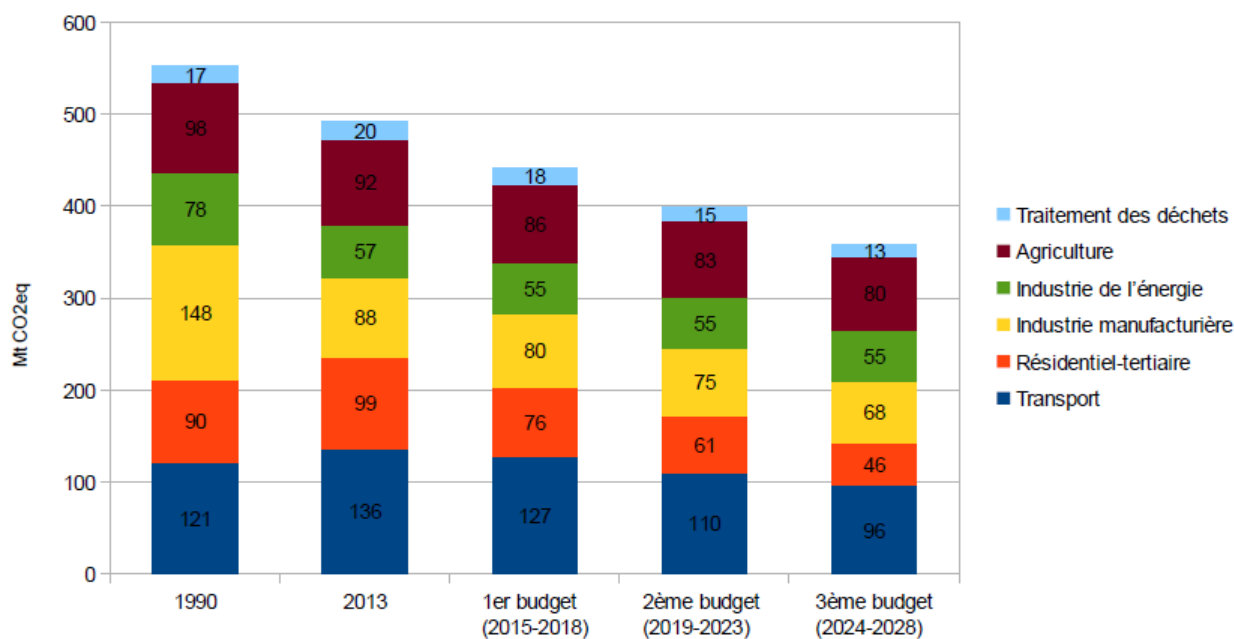


Figure 3 : Budgets carbone de la SNBC – Source SNBC⁴⁰ (émissions historiques 1990 et 2013 et moyennes annuelles pour les trois premiers budgets)

La PPE détermine implicitement un pourcentage d'énergies renouvelables et un pourcentage d'efficacité énergétique, qui sont cohérents dans le scénario de base avec les objectifs de la LTECV⁴¹. La stratégie de développement de la mobilité propre (SDMP) prévoit un développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables, des poids lourds (PL) fonctionnant au gaz naturel véhicule (GNV), un meilleur taux de remplissage des véhicules, le développement des modes doux pour

³⁷ Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>

³⁸ Voir <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-programmation-pluriannuelle-de-l-energie-a1526.html>

³⁹ Voir <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-programmation-pluriannuelle-de-l-energie-a1526.html>

⁴⁰ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

⁴¹ On passe de 155 Mtep en 2012 à 145 Mtep en 2018, 135 Mtep en 2023 et 125 Mtep en 2030 avec une progression linéaire. Les ENR représentent entre 150 et 165 TWh (32 à 25 % de la consommation dans une hypothèse de stabilité de cette dernière) pour l'électricité, 6 à 8 TWh de biogaz injectés dans le réseau, 19 Mtep d'EnR chaleur, entre 7 et 15 % de biocarburants dont un accent mis sur les carburants avancés. Le taux consolidé d'EnR n'est pas fourni.

les déplacements individuels, celui des modes non routiers pour le fret, le recours aux biocarburants et spécialement aux biocarburants avancés⁴², etc.

Une fiscalité carbone a été introduite sous forme d'une contribution climat énergie ; une composante carbone de la taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques a été introduite en 2014. La LTECV a prévu que cette composante carbone sera de 56 €/tCO₂eq en 2020 et de 100 €/t en 2030. Les lois de finances 2015 et 2016 ont précisé des valeurs intermédiaires⁴³. Un projet de corridor du prix du carbone, étudié dans le rapport Canfin-Grandjean⁴⁴ a également fait partie des mesures promues par la France dans le cadre de la révision de la directive sur le marché carbone européen.

1.2.4. Des scénarios pour aboutir à l'objectif recherché

La LTECV a été préparée par un débat national sur la transition énergétique (DNTE), alimenté par quatre scénarios focalisés sur la consommation énergétique⁴⁵. Ces scénarios⁴⁶ ont été baptisés DEC (pour décarbonation par l'électricité), DIV (pour diversité de la production énergétique), EFF (pour efficacité énergétique), et enfin SOB (pour sobriété énergétique). Ils reprennent des exercices prospectifs menés notamment par l'ADEME⁴⁷, par l'association négaWatt⁴⁸, par l'alliance de recherche Ancre⁴⁹. Ils ont aussi inspiré les travaux du *Deep Decarbonization Pathway Project*⁵⁰, préparé en vue de la COP 21 pour différents pays dont la France.

Une étude de février 2014⁵¹ commanditée par le ministère en charge de l'environnement effectue une comparaison des scénarios DEC, DIV, EFF et SOB, et rappelle les caractéristiques et l'origine des différents scénarios (Cf. Note *supra*) :

Scénario	Caractéristiques	Demande finale énergie 2050 (Mtep) hors PAC	Scénario de référence	Scénarios incarnant la trajectoire
----------	------------------	---	-----------------------	------------------------------------

⁴² Pour rappel : les biocarburants conventionnels ou de première génération ou encore agrocarburants sont tirées de productions alimentaires ; les biocarburants avancés ou de seconde voire troisième génération sont issus de biomasse ligno-cellulosique ou déchets, voire produits par des algues

⁴³ 14,5 €/t en 2015, 22€/t en 2016, 30,5€/t en 2017, 39 €/t en 2018 et 47,5€/t en 2019

⁴⁴ Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-actions-engagees-sur-le-prix.html>

⁴⁵ On rappelle que la consommation d'énergie, tous secteurs confondus, est la cause de 75 % à 80 % des émissions de GES.

⁴⁶ Voir pour une analyse des scénarios http://www.carbone4.com/download/Etude_Trajectoires_DNTE_C4.pdf

⁴⁷ L'ADEME a réalisé plusieurs scénarios prospectifs, dont un visant à tester la faisabilité d'une énergie 100 % renouvelable. Pour la vision 2050 de l'ADEME, voir <http://www.ademe.fr/connaitre/priorites-strategiques-missions/scenarios-2030-2050>

⁴⁸ Voir <http://www.negawatt.org/scenario-negawatt-p130.html>

⁴⁹ Voir <http://www.allianceenergie.fr/presentation-des-scenarios-energetiques-de-l-ancre.aspx>

⁵⁰ Voir http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf. Il y est relevé que le scénario DNTE le plus proche des présents choix en France est le scénario EFF

⁵¹ « Une vision pédagogique des 4 trajectoires étudiées dans le cadre du débat national sur la transition énergétique », février 2014, étude pour le MEDDE/CGDD/SEEIDD par A. Grandjean, E. Blanchet, E. Finidori du cabinet Carbone 4, http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

DEC	Demande forte énergie Décarbonation par électricité	124 Mtep dont 886 TWh électricité (21 % ENR 70 % NUC) 33 Mtep biomasse -72 % énergie fossile	Négatep	Négatep, RTE médian, ANCRE ELE, UFE	
DIV	Prix énergie élevé Fiscalité énergie-climat	118 Mtep dont 596 TWh électricité (43% ENR 50 % NUC) 29 Mtep biomasse -68 % énergie fossile	ANCRE DIV	ANCRE DIV, RTE Nouveau mix, DGEC AMS-O	
EFF	Evolution maîtrisée de certains besoins structurels (transport, artificialisation)	78 Mtep dont 495 TWh électricité (70 % ENR 25 % NUC) 37 Mtep biomasse -84 % énergie fossile	ADEME	ADEME, GRDF, ANCRE SOB, Encilocarb renf	
SOB	Sobriété de la consommation finale en biens et services, recyclage, agriculture biologique	72 Mtep dont 431 TWh électricité (92 % ENR 0 % NUC) 36 Mtep biomasse -91 % énergie fossile	négaWatt (et Afterres 2050)	négaWatt , Greenpeace, WWF, Global Chance	
Scénario	Rénovations des bâtiments résidentiels	Rénovation des bâtiments tertiaires	Transport	Industrie	Agriculture
DEC	500 000 Rénov/an avec -50 % chauffage. Suppression chauffage fioul. 33 Mtep, 62 % Elec en 2050	15 Mm²/an dès 2020 -50 % chauffage. Quasi suppression chauffage fioul. 21 Mtep, 76 % Elec en 2050	Stabilisation mobilité et fret VP électriques et hybrides 55 %, gazeux 0 % 30 Mtep en 2050	Efficacité énergétique -25 % 37 Mtep en 2050	Non détaillé
DIV	350 000 Rénov/an avec -45 % chauffage. Suppression chauffage fioul. 34 Mtep, 47 % Elec en 2050	15 Mm²/an dès 2030 -45 % chauffage. Quasi suppression chauffage fioul. 17 Mtep, 64 % Elec en 2050	Augmentation mobilité et fret VP électriques et hybrides 39 %, gazeux 25 % 29 Mtep en 2050	Efficacité énergétique -10 à -40 % 35 Mtep en 2050	Non détaillé
EFF	650 000 Rénov/an avec -40 % chauffage. Suppression chauffage fioul ⁵² . 19 Mtep, 18% Elec en 2050	24 Mm²/an dès 2020 -40 % chauffage. Quasi suppression chauffage fioul. 15 Mtep, 71% Elec en 2050	Stabilisation mobilité et fret VP électriques et hybrides 66 %, gazeux 28 % 15 Mtep en 2050	Efficacité énergétique 2 × -20 % 27 Mtep en 2050	Evolution alimentation Evolution pratiques agricoles
SOB	600 000 Rénov/an avec -65 % chauffage. Suppression chauffage fioul. 21 Mtep, 32 % Elec en 2050	24 Mm²/an dès 2030 -65 % chauffage. Quasi suppression chauffage fioul. 11 Mtep, 51 % Elec en 2050	Stabilisation mobilité et fret VP électriques et hybrides 26 %, gazeux 66 % 16 Mtep en 2050	Efficacité énergétique -20 à -60 % 21 Mtep en 2050	Evolution alimentation Evolution pratiques agricoles

⁵² Fioul « remplacé par d'autres vecteurs »

Tableau 1 : Comparaison des scénarios du débat énergétique – Source : étude carbone 4

Ces quatre scénarios sont normatifs, c'est-à-dire qu'ils partent de l'objectif à atteindre en 2050 et effectuent en quelque sorte du retro-planning. Ils se greffent le cas échéant sur des étapes définies pour 2030 par une approche exploratoire obtenue en modélisant l'évolution de la situation actuelle.

La sensibilité de ces scénarios à des événements extérieurs ou ruptures, a été peu étudiée. Des simulations sur l'impact macroéconomique des variations du prix du carbone existent cependant⁵³.

1.2.5. Une répartition des efforts entre secteurs ciblant le bâtiment

La SNBC révèle, au travers de son scénario de référence, l'effet attendu des mesures existantes ou prévues, dont l'ensemble des mesures introduites par la LTECV. Il résulte de l'effet cumulé de ces mesures qu'une part importante de l'effort porte sur la rénovation des bâtiments, ciblé également par le rapport de 2013 : -54 % en 2028 par rapport à 2013, contre -30 % pour les transports, -23 % pour l'industrie⁵⁴, -13 % pour l'agriculture, -3 % pour la production d'énergie. Le gisement est en effet considérable et au moins techniquement immédiatement exploitable pour partie, à la différence d'autres secteurs à plus grande inertie comme les transports, difficiles à décarboner comme l'agriculture, ou déjà très décarbonés comme la production d'énergie.

1.2.6. Synthèse sur les contraintes et objectifs

Le tableau suivant⁵⁵ récapitule les principaux objectifs adoptés au niveau mondial, européen et national :

	2020	2030	2050
Objectifs mondiaux	L'Accord de Paris ne fixe pas d'objectif quantitatif autre que une limitation à 2°C des augmentations moyenne de température. Les contributions nationales n'engagent pas juridiquement les États. Noter la contribution « nationale » de l'Union européenne, adoptée en mars 2015, et qui repose sur le cadre énergie climat 2030 adopté en octobre 2014.		
Objectifs UE	-20 % GES (ref. 1990) 20 % ENR 20 % EE	-40 % GES (ref. 1990) dont – 43 % par rapport à 2005 pour l'ETS et – 30 % par rapport à 2005 pour les secteurs hors	-80 à -95 % GES (ref. 1990)

⁵³ Par exemple les travaux de France Stratégie (<http://www.strategie.gouv.fr/publications/transition-energetique-vue-modeles-macroeconomiques>) concluent que les modèles convergent sur une diminution des émissions de CO₂ de 15 % lorsque une taxe carbone représentant 1 % du PIB est mise en place, mais qu'ils divergent sur le gain d'efficacité énergétique associé à cette mesure. La hausse du prix de l'énergie a un effet négatif sur l'activité économique d'autant plus important que le marché du travail n'est pas fluide. Ces études indiquent que l'utilisation des sommes collectées par une taxation de l'énergie doit être bien réfléchi et privilégier allègements de charges, soutien à l'efficacité énergétique ainsi qu'à la recherche et au développement.

⁵⁴ Qui a déjà significativement réduit ses émissions, comme les industries de l'énergie

⁵⁵ EE : efficacité énergétique, au sens : 20 % EE veut dire réduction de la consommation d'énergie *finale* de 20 % – SEQE : système d'échange des quotas d'émission – ENR : énergies renouvelables

		ETS 27 % ENR 27 % EE (indicatif)	
Objectifs France suite à répartition de l'effort UE	-14 % GES non SEQE (ref. 2005) -23 % ENR	-37 % GES non SEQE (ref. 2005)	
Objectifs France LTECV		-40 % GES (ref. 1990) 32 % ENR 20 % EE (ref. 2012)	-75 % GES (ref. 1990) 50 % EE (ref. 2012)
Objectifs France SNBC (cohérence avec LTECV)	-20 % GES en 2018, -28 % en 2023, -35 % en 2028 (ref. 1990)		
Objectifs France PPE	13 % EE en 2023 dans le scénario de base		

Tableau 2 : Objectifs climat-énergie – Source : mission

L'accord de Paris, bien qu'il ne comprenne pas d'objectif chiffré en termes d'émission s'imposant aux pays qui l'ont ratifié, traduit le début d'un processus d'engagements volontaires dont on espère qu'il permettra d'infléchir la courbe des émissions par l'adhésion puis l'implication de tous les pays. L'accord a aussi certainement eu un effet moteur sur les résolutions prises ultérieurement. Toutefois à ce stade la somme des INDC ne permet pas d'atteindre l'objectif de 2°C, a fortiori pas celui de 1,5°C.

Le paquet européen 2030 se voulait ambitieux avant la réunion de la COP 21. Le niveau des émissions visé se situe sur une trajectoire plausible de diminution en ligne avec le haut de la fourchette définie pour 2050 au niveau européen (80 à 95 % de réduction, soit un facteur compris entre 5 et 20). Sa mise en œuvre ne sera pas aisée si l'on en juge par les évolutions observées dans de grands pays européens ainsi que les projections actuelles pour l'Union Européenne, selon lesquelles des politiques complémentaires sont déjà requises pour atteindre les objectifs de 2030 (Cf. annexe parangonnage).

Les objectifs de la France sont cohérents avec les objectifs européens. Ils sont exprimés au travers d'indicateurs nombreux mais complémentaires (dont : émissions de GES, consommation d'énergie finale, consommation d'énergie primaire, pourcentage d'énergies renouvelables, efficacité énergétique⁵⁶), ce qui peut nuire à la lisibilité du dispositif et faire passer les émissions de GES au second plan.

1. Piloter la transition énergétique en donnant une plus grande importance à la réduction des émissions de GES

⁵⁶ Sans compter les objectifs relatifs à la qualité de l'air

1.3. L'évolution des températures et des émissions de GES

1.3.1. Données passées de températures et d'émissions de GES

Les inventaires d'émissions de GES ont été codifiés dans le cadre de la CCNUCC. Les substances inventoriées sont les sept gaz ou familles de gaz à effet de serre direct ainsi que les quatre gaz à effet de serre indirect :

Gaz à effet de serre direct	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HFC	PFC	SF ₆	NF ₃
Pouvoir de réchauffement global (PRG) ⁵⁷	1	25	298	77 à 14 800	7 390 à 12 200	22 800	17 200
Gaz à effet de serre indirect		SO _x	NO _x	COVNM	CO		

Tableau 3 : Gaz à effet de serre et leur PRG valeur 2013 – Source : CITEPA

Par convention, les inventaires CCNUCC recensent les émissions se produisant sur le territoire considéré, sans inclure celles qui correspondent à la fabrication de produits importés et soustraire celles qui correspondent à la fabrication de produits exportés. Les différences peuvent être significatives : en 2012, les émissions françaises par habitant étaient de 7,3 tCO₂éq/an tandis que l'empreinte tenant compte des importations et des exportations était de 10,5 tCO₂éq/an⁵⁸.

En France, le centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA) a reçu mission de réaliser et de publier les inventaires à fournir pour la CCNUCC et pour satisfaire les autres obligations de rapportage. L'annexe thématique relative aux inventaires détaille les différents formats et périmètres géographiques ou sectoriels et rappelle que la prise en compte de l'utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCF), connue avec une incertitude plus importante que celle relative aux combustions d'hydrocarbures, diminue par ailleurs les émissions en France d'environ 10 %. Un dernier facteur à bien prendre en compte est la correction éventuelle des séries pour tenir compte des variations climatiques ou des changements de méthodologies.

1.3.1.1. Températures, concentrations et émissions de GES dans le monde

Dans le monde, les années récentes ont été parmi les plus chaudes observées.

⁵⁷ Le PRG est à 100 ans; voir <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>

⁵⁸ Voir les chiffres clés du climat publiés par le MEEM – http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_du_climat_2016.pdf page 26



Figure 4 : Anomalie de la moyenne annuelle de l'air, en surface dans le monde – Source Météo-France⁵⁹, à partir des données de l'université de East Anglia

Les concentrations de CO₂ sont en hausse : mesurées à l'île d'Amsterdam, elles ont progressé régulièrement de 280 ppm à l'ère pré-industrielle à 340 ppm en 1980 et 400 ppm en 2016⁶⁰.

En revanche, selon l'agence internationale de l'énergie, les émissions du seul CO₂ dû à la combustion au niveau mondial sont restées stables en 2015 pour la seconde année à 32,1 Milliards de tonnes après avoir quasiment doublé depuis 1975⁶¹. Ce niveau est supérieur de 57 % à celui observé en 1990 (20,5 GtCO₂), qui sert de référence pour le facteur 2 à atteindre en 2050.

1.3.1.2. En France

Les observations de températures montrent également qu'en France les années récentes sont parmi les plus chaudes observées. On observe également que le réchauffement est plus marqué en France qu'en moyenne dans le monde (1°C versus 0,6°C).

⁵⁹ Voir <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>

⁶⁰ Voir http://www.lemonde.fr/planete/article/2013/05/06/le-taux-de-co2-dans-l-air-au-plus-haut-depuis-plus-de-2-5-millions-d-annees_3171507_3244.html

⁶¹ Voir <https://www.iea.org/newsroomandevents/pressreleases/2016/march/decoupling-of-global-emissions-and-economic-growth-confirmed.html>

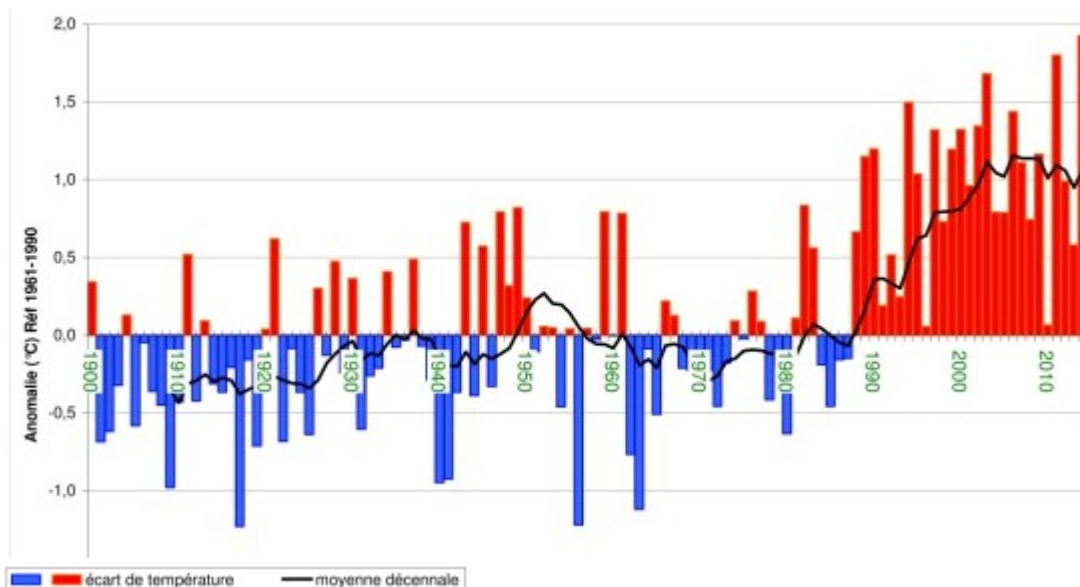


Figure 5 : Anomalie de la moyenne annuelle de l'air, en surface en France – Source Météo-France⁶²

L'évolution des émissions est retracée dans les rapports du CITEPA⁶³

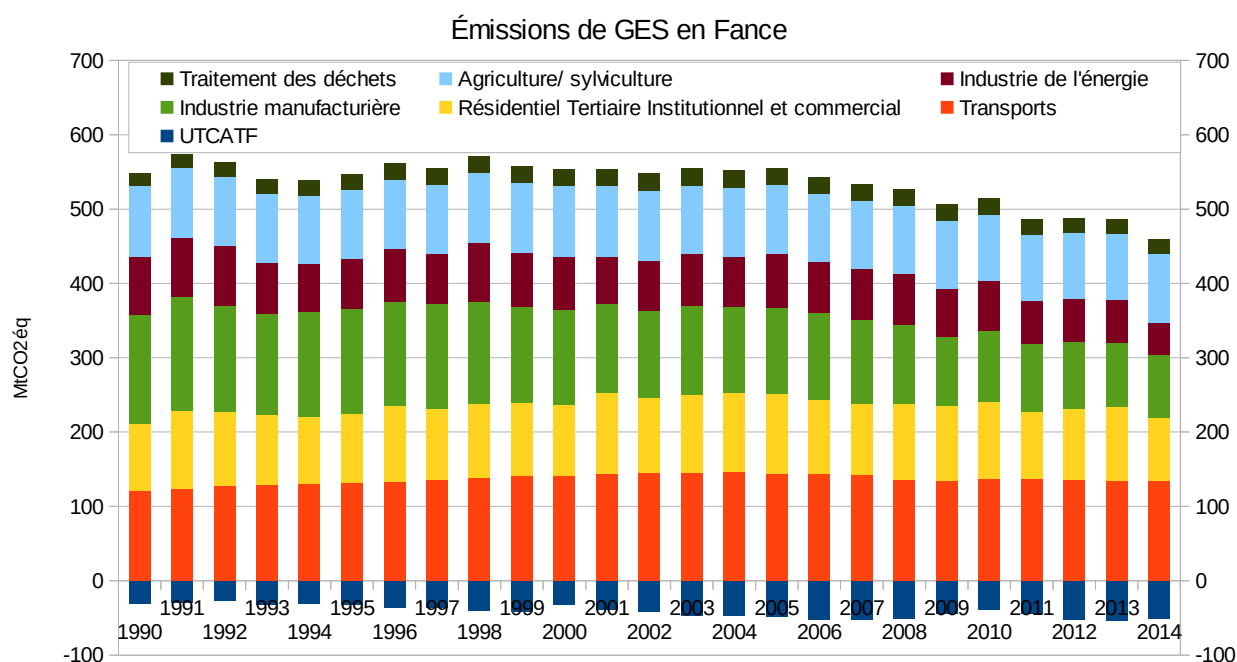


Figure 6 : évolution des émissions de CO2 en France – Source CITEPA inventaire SECTEN (format « plan climat », périmètre Kyoto)

⁶² Voir <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>

⁶³ Voir http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten#Evolution_emi_gd_secteurs

Les émissions 2015 estimées à 456 MtCO₂eq hors UTCF, augmentent de 10 MtCO₂eq par rapport à 2014, dues notamment pour 8Mt CO₂eq au résidentiel tertiaire (à cause d'un hiver plus froid) et 2 MtCO₂eq au transport (à cause d'un prix des carburants bas).

L'empreinte carbone, intégrant importations et exportations, après avoir atteint un maximum au milieu de la décennie 2000, semble récemment avoir retrouvé en 2012 (666 MtCO₂eq) le niveau de 1990 (659 MtCO₂eq). Pour le seul CO₂, l'empreinte de 2015 est de 532 MtCO₂ contre 477 MtCO₂ en 1995.⁶⁴

1.3.2. L'évolution dans le futur des émissions de GES en France

Partant des données observées, les projections climatiques reposent sur des modélisations qui prennent en compte plusieurs scénarios d'émissions de GES.

L'évolution des émissions peut être appréciée au travers des scénarios évoqués *supra* pour ce qui concerne la France, et en agrégeant les contributions nationales pour ce qui concerne les émissions mondiales.

Une comparaison des émissions de GES selon les scénarios, réalisée dans le cadre des travaux du DNTE par M. Salomon, conclut à l'atteinte du facteur 4 par les seuls scénarios EFF et SOB. Les deux autres scénarios DIV et DEC satisfont une diminution d'un facteur 4 des émissions pour ce qui concerne les émissions liées à la combustion, qui représentaient 371,2 MtCO₂eq et 67 % des émissions en 1990. Ils ne satisfont pas globalement une telle diminution hors UTCF quand on prend en compte les émissions de GES d'origine agricole ainsi que celles liées aux processus industriels et aux déchets, qu'il est plus difficile de réduire d'un tel facteur.

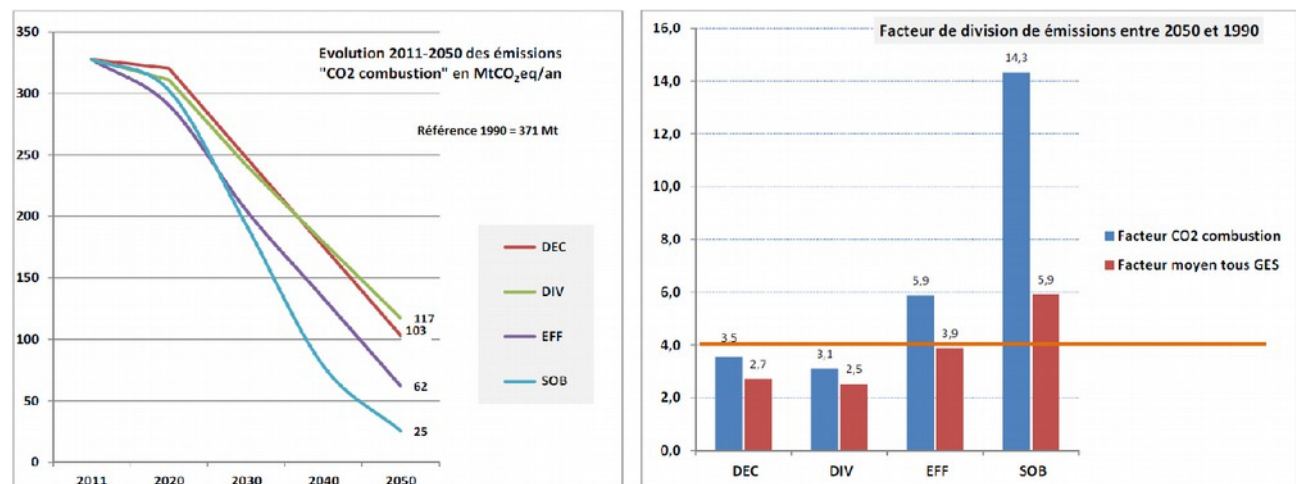


Figure 7 : Evolution des émissions de CO₂eq énergétiques et facteur de division pour l'ensemble des émissions– Source analyse comparative des scénarios par M. Salomon⁶⁵

⁶⁴ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2587/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2017.html>

⁶⁵ Ce point est évoqué dans l'étude carbone 4 évoquée *supra* et détaillé dans l'analyse de M. Salomon <http://www.negawatt.org/telechargement/Docs/DNTE-Comparatif-scenarios-GES-Facteur4-2013.pdf>

Plus récent, le scénario de référence de la SNBC est un scénario dit AMS2 (avec mesures supplémentaires) par opposition au scénario tendanciel AME (avec mesures existantes)⁶⁶. Il est indicatif. Il se rapproche du scénario EFF du DNTE.

L'atteinte du facteur 4 toutes émissions confondues, en se basant par exemple sur l'inventaire au format Plan climat, périmètre de Kyoto qui couvre l'intégralité des territoires français, requiert de passer d'émissions de 548 MtCO₂éq en 1990 (hors UTCF) à un quart de ces émissions en 2050, soit 137 MtCO₂éq. Les taux annuels de décroissance requis⁶⁷ pour atteindre le facteur 4, en partant de diverses années de référence augmentent.

Année	2050	1990	2000	2005	2010	2013	2014
Émissions de GES (MtCO ₂ éq) hors UTCF ⁶⁸	137,0	548,1	554,3	554,8	514,5	486,5	458,9
Taux annuel de décroissance requis		2,28%	2,76%	3,06%	3,25%	3,37%	3,30%

Réduire les émissions GES à 137 Mt en moins de deux générations est un véritable défi. Cela suppose d'amplifier le rythme de réduction par rapport à la période 2005-2013 et nécessite notamment d'obtenir des réductions de l'ordre de 9 à 10 MtCO₂éq par an en moyenne jusqu'en 2050.

1.3.3. Sensibilité des scénarios

La fragilité des scénarios face à des évolutions, ruptures, risques et difficultés qui ont pu être sous-estimés et/ou en raison de l'incertitude sur leurs données d'entrée amène par ailleurs à faire preuve de prudence sur la réalisation effective de ces visions prospectives, à réactualiser périodiquement les trajectoires et à développer une mitigation préventive de ces risques, comme évoqué dans le tableau suivant :

Risque ou rupture	Impact	Mitigation
Sécheresse, élévation des températures , risques climatiques	Refroidissement des centrales, production hydroélectrique, moindre croissance biomasse, surmortalité, perte de surface agricole, migrations	Implantations centrales, arbitrage entre usages de l'eau, sobriété des processus, programmes d'adaptation agriculture et forêt, habitat passif, politique migratoire
Prix élevés énergie	Favorise efficacité énergétique, augmente recettes fiscales de l'État mais diminue les possibilités d'investissement des autres acteurs	Efficacité énergétique, investissement, taxation supplémentaire de l'énergie et du carbone en période de prix bas
Prix bas énergie	Décourage efficacité énergétique et investissement production, favorise le pouvoir d'achat et l'investissement	Maintien des taxations énergie et carbone, efficacité énergétique
Accidents ou déceptions ⁶⁹ technologiques	Décrédibilise la filière correspondante, pénurie, absence de solution technique	Contrôle indépendant de sûreté, lutte contre la cybercriminalité
Pénuries alimentaires	Perturbations sociales graves, remise en cause de l'agro-écologie, des utilisations du sol non alimentaires	Recherche agronomique, bilans agro-écologique, maîtrise foncier

⁶⁶ Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone>

⁶⁷ Si l'on fait l'hypothèse que le taux d'effort est constant

⁶⁸ Format plan climat, périmètre Kyoto, hors UTCF

⁶⁹ potentiel non réalisé, problèmes non prévus, etc.

Faible évolution des mentalités	Pas d'évolution de l'alimentation, de la consommation, du mode de vie, refus fiscalité carbone	Pédagogie, étude des comportements, incitations économiques à la sobriété et décarbonation
Risques géopolitiques et climatiques	Oligopoles, difficultés d'approvisionnement, migrations	Maîtrise des technologies, contrats long terme
Mutations démographiques	Accroissement de la population, vieillissement, pandémies, déplacements	Étude des comportements, éducation, santé, mutations sociales
Aspects déstabilisateurs de l'autoproduction énergie	Équilibrage du réseau, santé financière des producteurs, perception des taxes	Régulation autoproduction et autoconsommation, cadrage, ciblage sur secteurs pertinents

Tableau 4 : risques pesant sur les scénarios – Source : collège énergie-climat du CGE-CGEDD

1.3.4. Incertitudes sur les émissions mondiales de GES et les températures

Au niveau mondial, la CCNUCC a estimé, en fonction des 161 INDC⁷⁰ couvrant 189 pays représentant la quasi-totalité des émissions hors transport international, la valeur des émissions⁷¹. Il en ressort que les engagements -non contraignants- des États à ce stade ne représentent encore qu'une fraction minoritaire de l'effort requis.

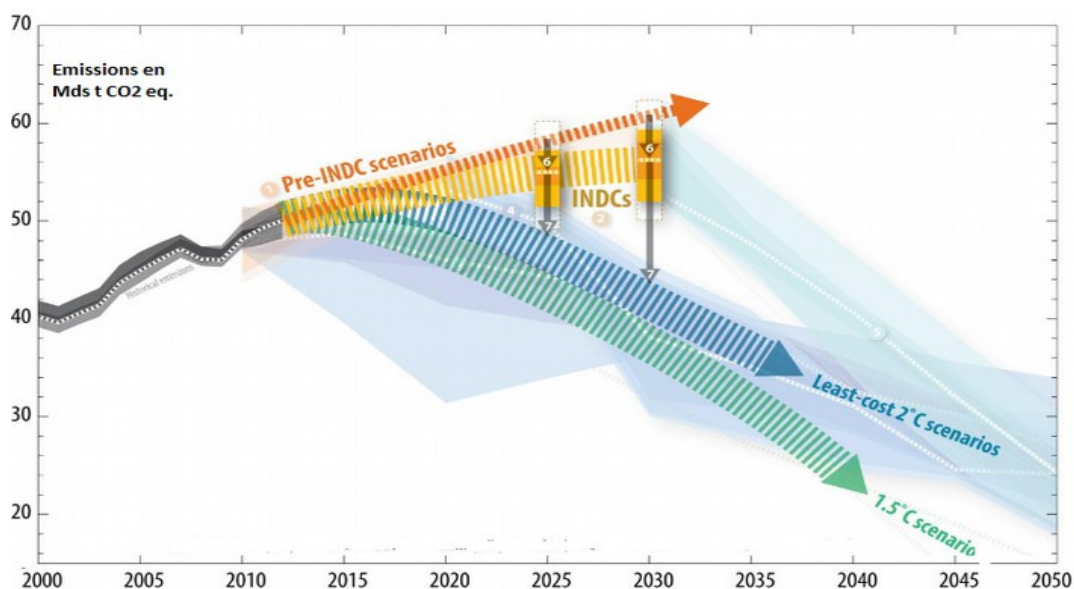


Figure 8 : Évolution des émissions au niveau mondial – Source : GIEC et CCNUCC

Les émissions de GES s'élèveront à 55 GtCO₂eq en 2025 et à 56,2 GtCO₂eq. en 2030. Ces valeurs traduisent un infléchissement de la courbe des émissions, mais restent supérieures à celles qui permettraient de limiter le réchauffement moyen à 2°C à

⁷⁰ INDC : *intended nationally determined contribution*

⁷¹ Voir <http://unfccc.int/resource/docs/2016/cop22/eng/02.pdf>

l'échelle du globe à moindre coût. Les projections et leur impact sur les températures restent néanmoins très incertaines⁷².

1.3.5. Constat provisoire

1.3.5.1. Situation mondiale, européenne et française

Au niveau mondial, la limitation de l'élévation de la température moyenne à 2°C, voire 1,5 °C, apparaît très difficile à réaliser. La règle GIEC du plafond aux émissions cumulées tend à requérir des émissions négatives à partir de 2050.

Au niveau européen, l'objectif d'une diminution de 20 % des émissions en 2020 devrait être largement atteint selon la Commission européenne⁷³. Les projections 2030 sur le scénario de référence 2016 font état d'une diminution de 35 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie et de 46 % des émissions hors CO₂ par rapport à leur niveau de 1990. Elles ne permettent pas d'atteindre l'objectif de -40 % si on ne prend pas en compte le secteur UTE⁷⁴, qui est lui-même sujet à de larges incertitudes. Plus généralement l'atteinte des objectifs européens de 2030 et 2050 suppose des mesures ambitieuses ciblées sectorielles, et une prise en compte dès maintenant de l'horizon 2050 en raison de la durée des développements nécessaires⁷⁵. Le cas du Royaume-Uni, décrit dans l'annexe « parangonnage » illustre aussi ces difficultés : il est par exemple prévu un recours à la capture et au stockage du CO₂ (CSC), technologie qui n'est pas maîtrisée aujourd'hui.

Au niveau français, le rythme requis de diminution des émissions, qui devrait être d'environ 9 Mt CO₂eq par an réduit de la même quantité chaque année) ou de 3,3 % (si on réduit d'un même taux chaque année), est à peu près respecté sur les années récentes mais devient de plus en plus difficile à tenir et n'est pas garanti pour les années à venir compte tenu du contexte macro-économique.

⁷² C'est pourquoi au niveau mondial, le dernier rapport du GIEC s'appuie sur quatre « representative concentration pathways » (RCP). Le RCP 2.6 est le plus volontariste et permet de rester en deçà des 2°C. Le RCP 4.5 correspond à un forçage radiatif de 4,5 W/m² après 2100. Pour une description des scénarios voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Decouvrir-les-nouveaux-scenarios.22612.html>. Le RCP 4.5 prend en compte une stabilisation des émissions autour de l'année 2040 (avec un réchauffement de l'ordre de 2,5°C en 2100), le RCP 6.0 une stabilisation autour de l'année 2075 (avec un réchauffement de l'ordre de 3,5°C). Le « rapport Jouzel » (Voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4.pdf) dans le prolongement des travaux du GIEC précise les conséquences de ces émissions pour notre pays. Pour le scénario RCP 4.5, l'augmentation de température en métropole avec 75 % de chance de non dépassement atteint ainsi 2°C en hiver et 3°C en été en 2100.

⁷³ Voir http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/docs/climate_energy_priorities_en.pdf. La Commission prévoit des émissions de GES en baisse de 24 %, des ENR représentant 21 %, une efficacité énergétique en hausse de 17 % (vs un objectif de 20%).

⁷⁴ Voir https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RE_SULTS%20%282%29-web.pdf

⁷⁵ Rapport IDDRI de novembre 2016, <http://www.iddri.org/Publications/State-of-the-Low-Carbon-Energy-Union-Assessing-the-EU-s-progress-towards-its-2030-and-2050-climate-objectives>

1.3.5.2. Retour sur quelques préconisations du rapport de 2013 : empreinte et incertitude sur les données d'émission

Le rapport 2013 pointait l'importance d'une réussite de la COP 21, qui finalement a sans doute obtenu le meilleur résultat possible, même s'il ne se traduit pas par des obligations (hors rapportage).

Il signalait aussi que la décroissance observée des émissions était trompeuse car l'empreinte carbone de la France (liée aux importations et exportations) avait significativement crû en 20 ans ; il semble que cette empreinte ait plafonné au milieu des années 2000 et ait décliné récemment, mais elle décroît peu par rapport aux émissions et reste proche de celle de 2000 et supérieure à celle de 1990. Un suivi de l'empreinte carbone apparaît donc nécessaire. La SNBC donne des orientations en ce sens, même si la mise en œuvre pratique n'est pas simple.

Année	1990	2000	2010	2012
Empreinte (MtCO ₂ éq)	659	684	690	666
Variation par rapport à 1990		+3,79%	+4,70%	+1,06%
Émissions hors UTCF (MtCO ₂ éq)	548,1	554,3	515	488
Variations par rapport à 1990		+1,13%	-6,13%	-10,89%

Outre l'empreinte, les émissions sur la durée des cycles de vie, et non seulement instantanées, sont à prendre en compte pour une vision temporelle appropriée des émissions et la prise en compte du long terme.

2. Prendre en compte, dans les approches sectorielles ou transversales, l'énergie grise et le carbone gris utilisés dans le cycle de vie

Le rapport regrettait que l'Union Européenne repousse à plus tard les véritables efforts : effectivement il sera plus difficile de passer de -40 % en 2030 à -60 % en 2040 et -80 % ou plus en 2050 que de passer de -24 % en 2020 à -40 % en 2030 ou de diminuer les émissions de 24 % en 30 ans. *A contrario*, l'Union Européenne peut arguer qu'elle a déjà retenu un objectif difficile à atteindre pour 2030 et qu'elle montre en quelque sorte l'exemple parmi les pays de la CCUNCC.

Le rapport de 2013 préconisait également de développer une fonction d'observatoire. Les budgets carbone sectoriels de la SNBC en sont une réalisation. Cependant, comme on le verra *infra*, quelques données manquent pour bien apprécier les actions conduites. Mais surtout, les données correspondantes restent peu médiatisées et sont difficiles à présenter simplement du fait de trop nombreux formats, unités, périmètres, et de manière générale définitions des données⁷⁶ (voir annexe).

⁷⁶ Quelques exemples : énergie primaire ou finale ; périmètre géographique avec ou sans outre-mer ; données de consommation énergétique corrigées ou pas des variations climatiques ; unités énergétiques diverses et facteurs variables de conversion ; etc.

3. Fiabiliser, rationaliser, harmoniser et simplifier les données et indicateurs relatifs au climat ainsi que leur accès, pour une meilleure connaissance et compréhension par les décideurs et le public; ces indicateurs ne doivent pas uniquement être des valeurs instantanées, certains doivent permettre de visualiser l'urgence et la faisabilité de transformations longues à mettre en œuvre (cas de la décarbonation de l'industrie); ces indicateurs ne doivent pas se limiter aux émissions mais aussi couvrir l'empreinte et le cycle de vie.

Le rapport pointait enfin les incertitudes importantes existantes dans l'appréciation des émissions de GES correspondant au secteur agricole et au secteur UTCF, ce qui reste vrai : des efforts de recherche sont à poursuivre dans ce domaine.

Une annexe reprend les points soumis au débat et les recommandations du rapport de 2013 et effectue une actualisation.

2. Les évolutions par grand secteur

Les secteurs étudiés ici sont ceux du rapport de 2013, couvrant l'ensemble des émissions, et qui sont aussi les divisions traditionnelles en matière d'émission : agriculture (et UTCF), bâtiment, énergie, industrie et transports. Ils font l'objet d'annexes thématiques, compléments du présent rapport. Une annexe de comparaisons internationales complète les annexes thématiques.

2.1. Agriculture et UTCF⁷⁷

Mêler les émissions de l'agriculture (1/5e des émissions) et l'UTCF (puits compensant 1/10e des émissions) ne va pas de soi, de fait l'UTCF est souvent séparé dans les formats de rapportage officiels. De même, l'UTCF mêle la forêt, principale composante de l'UTCF mais qui est un sujet *sui generis*, et utilisation et changements d'affectation des terres et forêts. Le présent rapport garde ces classifications à des fins de comparabilité avec le précédent rapport.

2.1.1. Un développement des connaissances

En raison du manque de connaissances, le rapport de 2013 recommandait de soutenir la recherche sur la connaissance des flux de carbone et d'azote dans les sols agricoles et forestiers. Plusieurs exercices, réalisés à partir de 2013, ont cherché à lier agriculture et UTCF d'une part, énergie et climat d'autre part, en s'appuyant sur les expertises de l'INRA et de l'IGN, de l'ADEME, du CITEPA, mais aussi des acteurs issus de la société civile comme le Réseau Action Climat ou l'entreprise associative SOLAGRO⁷⁸. L'INRA a par ailleurs fait du climat l'un des quatre axes de sa stratégie à l'horizon 2025. Il demeure néanmoins beaucoup d'incertitudes et un besoin d'approfondissement des connaissances. L'une des difficultés est la variabilité des émissions en fonction des conditions pédologiques et météorologiques ou de la situation géographique des parcelles étudiées.

Les connaissances disponibles ont fondé les politiques publiques que le MAAF cherche à mettre en place.⁷⁹

La forêt guyanaise est un cas à part compte tenu de son étendue et des enjeux locaux qui sont différents de ceux de la métropole. Elle est beaucoup moins connue que les autres forêts françaises mais semble un émetteur net de GES en raison notamment de la déforestation⁸⁰.

⁷⁷ Pour plus de détails, voir annexe « Agriculture et UTCF »

⁷⁸ Par exemple étude commanditée par le MAAF, le MEDDE et l'ADEME à l'Inra Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de GES et l'exercice AFTERRES de SOLAGRO réalisé en 2013, - <http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Afterres2050-Web.pdf>;

⁷⁹ Sur la forêt, une étude de l'Inra est en cours sur les 4 leviers d'atténuation du changement climatique (séquestration dans les écosystèmes, séquestration dans le bois, substitution énergie et substitution matériau), permettant de projeter des situations 2050 à partir de scénarios prenant en compte un changement climatique modéré ou fort, afin d'éclairer les choix.

4. Développer les connaissances sur les conséquences des changements d'affectation des terres, la gestion optimale des forêts du point de vue des émissions de GES, les bilans d'absorption ou émissions forestières et notamment de la forêt guyanaise.

2.1.2. Des règles de comptabilisation qui ont progressé

Le rapport de 2013 critiquait l'imputation au secteur de l'agriculture des GES liés à la production de biomasse, et l'imputation au secteur UTCF des GES liés à l'artificialisation des sols au bénéfice d'autres secteurs. Il n'est sans doute pas souhaitable de modifier ces imputations, par commodité de calcul et pour conserver les bonnes incitations sur la biomasse. En revanche, plusieurs éléments méthodologiques de l'inventaire CCNUCC ont été revus, par exemple ceux relatifs aux déjections animales ou au stockage du carbone dans le bois non utilisé pour produire de la chaleur, ce qui a entraîné des corrections significatives sur les inventaires passés. De manière générale le stockage de carbone dans le bois matériau et la substitution de bois matériau à d'autres matériaux sont une manière saine de réduire les émissions, d'après des études récentes⁸¹.

2.1.3. Des évolutions récentes

Plusieurs évolutions méritent d'être signalées dans le secteur agricole et UTCF, qui devraient limiter les émissions de GES.

2.1.3.1. Développement de l'agro-écologie

L'agro-écologie est fortement promue par le MAAF, qui cherche ainsi à concilier agriculture et écologie (création d'une direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises et d'un comité national d'orientation et de suivi de l'agro-écologie⁸², rapportage). Elle est indirectement soutenue par les nouvelles règles de la PAC⁸³. Il faudrait pouvoir mesurer son effet réel.

⁸⁰ Source : SNBC http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

⁸¹ Par exemple l'étude « Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 », <http://agriculture.gouv.fr/leviers-forestiers-en-termes-dattenuation-pour-lutter-contre-le-changement-climatique-aux-horizons> . Voir annexe agriculture et UTCF

⁸² Voir <http://draaf.bourgogne-franche-comte.agriculture.gouv.fr/Comite-National-d-Orientation-et>

⁸³ On notera l'obligation d'utiliser au moins 30 % des crédits inscrits dans les programmes de développement ruraux pour des actions en faveur de l'environnement et du climat. La PAC met également l'accent sur le maintien des prairies permanentes. Voir http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/1501-pac-fiche-prairies_permanentes_cle0ba769.pdf

2.1.3.2. Alimentation et climat

L'alimentation est un sujet connexe à la lutte contre le changement climatique, notamment en raison des menaces qu'il fait peser sur la production alimentaire (PED) et de l'hypothèse de changements d'habitudes alimentaires dans certains scénarios de réduction des émissions agricoles. La lutte contre le gaspillage alimentaire est par ailleurs une politique promue par le MAAF (objectif de le diminuer d'un facteur deux d'ici 2025⁸⁴). Le contenu gris de l'alimentation française est enfin tout à fait significatif⁸⁵. Un approfondissement des liens entre alimentation et maîtrise des émissions semble utile.

2.1.3.3. Mobilisation de la ressource forestière

La mobilisation de la ressource bois est un leitmotiv des politiques forestières. La France qui dispose d'un grand patrimoine forestier n'exploite que la moitié de sa croissance annuelle. Du seul point de vue des émissions de GES, l'exploitation du bois matériau (substitution du bois à d'autres matériaux et énergies plus émissifs, stockage du carbone), puis *in fine* sa valorisation énergétique est préférable sur la durée à un vieillissement de la forêt. Ceci peut aller à l'encontre de « règles » comme la « *no debit rule* » du protocole de Kyoto⁸⁶ qui refuse toute décroissance des puits de carbone avec des conséquences possibles sur le chemin vers la saturation du puits forestier par vieillissement. Beaucoup d'initiatives sont en cours. Un comité stratégique de la filière bois a été créé⁸⁷. La construction en bois est encouragée.

2.1.3.4. L'artificialisation des sols se poursuit

Le rapport de 2013 préconisait de développer les études et recherches sur l'artificialisation. En fait, le phénomène (+25 % entre 1990 et 2013, 600 km²/an actuellement, avec environ 3 % des émissions de GES qui lui sont imputables) a déjà fait l'objet de nombreuses études et a été bien exploré par les acteurs de l'aménagement⁸⁸. Mais les outils dont disposent les gestionnaires de l'affectation des sols ne suffisent pas à limiter une urbanisation des sols. Les différences de valeur entre les terres selon leur usage entretiennent l'artificialisation et sont donc du ressort de politiques foncières et fiscales adaptées. Ce sujet transversal est développé en fin de rapport.

⁸⁴ Voir <http://agriculture.gouv.fr/nouvelle-feuille-de-route-du-pacte-national-de-lutte-contre-le-gaspillage-alimentaire>

⁸⁵ 13 % des besoins énergétiques français selon des estimations, à confirmer, d'un GT du collège énergie et climat du CGE-CGEDD. De plus ce contenu gris serait en croissance, tant par l'importation de produits agricoles qu'alimentaires

⁸⁶ maintenue dans la proposition de la Commission sur le partage de l'effort hors ETS

⁸⁷ Voir <http://csfbois.fr/>

⁸⁸ Cf annexe Agriculture et UTCF

2.1.4. Une difficulté majeure à dépasser le facteur 2 en agriculture et sylviculture

Même en tablant sur la réussite des politiques d'agro-écologie et sur une évolution des pratiques alimentaires, les scénarios prospectifs montrent que les possibilités de réduction pour le secteur agricole, par ailleurs sensible, sont plus limitées que pour d'autres secteurs (selon l'étude Afterres, on peut espérer au mieux un facteur de réduction compris entre 2 et 2,5 à l'horizon ...). Le secteur forestier, principale composante de l'UTCF, doit pouvoir contribuer à long terme à la maîtrise des émissions⁸⁹, notamment au moyen d'une exploitation accrue, qui suppose de faire décroître le puits forestier à court terme pour utiliser le bois à des fins de substitution et stockage de carbone avant valorisation thermique.

2.2. Le bâtiment⁹⁰

2.2.1. Un secteur clef pour diminuer les émissions de GES

C'est le secteur le plus consommateur d'énergie (45 % en 2014, avec des consommations finales corrigées des variations climatiques qui ne décroissent pas depuis 2000), et un émetteur important de GES (26 % des émissions). De plus des solutions techniques existent pour réduire les émissions de GES. Le bâtiment a donc été identifié dans les scénarios et stratégies comme un secteur clef dans la lutte contre les gaz à effet de serre, avec parfois des potentiels de réduction d'un facteur 10.

C'est, selon la SNBC, le secteur qui doit réduire le plus ses émissions, à hauteur de 50 % entre 2013 et le troisième budget carbone se terminant en 2028⁹¹, et d'au moins 87% en 2050.

Pour cela, la rénovation des bâtiments existants constitue l'enjeu principal, sachant que l'on sait aujourd'hui construire – et que l'on construit désormais, grâce à la RT 2012 – des bâtiments neufs peu énergivores⁹². Les pouvoirs publics ont retenu un objectif de 500 000 rénovations énergétiques de logements par an, mais les derniers chiffres les estiment à 288 000 logements privés ayant subi une rénovation thermique significative performante ou très performante⁹³ et 105 000 logements HLM en 2014. De plus, la notion même de rénovation énergétique reste variable et peu précise, et la compétence des acteurs parfois insuffisante. Peu de données existent par ailleurs sur l'effort de réhabilitation dans le tertiaire, les postes réglementaires de consommation baissent lentement mais sont plus que compensés par l'augmentation des usages d'électricité spécifique.

⁸⁹ Voir à la neutralité carbone ambitionnée par la France en 2050

⁹⁰ Pour plus de détails, voir annexe « Bâtiment ». Il existe en France environ 34,5 millions de logements, et 340 Mm² de surface tertiaire chauffée. 5,4 millions de ménages sont locataires dans le parc social.

⁹¹ De 99 à 46 MteCO₂, Cf. figure 2 en 2.1.3. Comparé au scénario tendanciel, cette réduction n'est par contre que de 34 %.

⁹² Même s'ils restent trop émissifs, comme l'a montré le rapport de 2013

⁹³ Voir http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf pour la définition des gestes « performants » et « très performants » : un geste est dit « performant » s'il est théoriquement compatible avec les niveaux requis pour les critères d'obtention des aides 2014 (CIDD et éco-PTZ)

Le rapport de 2013 proposait de redonner la priorité à la lutte contre les émissions de GES et de reconsidérer à cet égard le principe de l'évaluation en énergie primaire. Cette recommandation n'a pas encore été mise en œuvre et les émissions de GES passent au second plan face aux considérations énergétiques. La future réglementation relative à la construction neuve (cf. *infra*), en cours de préparation, doit toutefois prendre en compte (en plus des consommations d'énergie primaire) les émissions de carbone ainsi que le cycle de vie du bâtiment. En revanche, aucune évolution analogue n'est envisagée pour la réglementation thermique des bâtiments existants.

2.2.2. La rénovation des bâtiments existants

Il est difficile d'avoir une vision précise de la dynamique du secteur et des progrès accomplis.

2.2.2.1. Le logement social

Les bailleurs sociaux se sont mobilisés pour rénover un peu plus de 105 000 logements par an, en évaluant les progrès accomplis et devraient poursuivre leurs investissements à ce rythme. L'objectif de 120 000 logements sociaux par an paraît atteignable dans cette filière structurée.

2.2.2.2. Les autres logements

Les 288 000 logements qu'affiche l'observatoire de l'ADEME sont insuffisamment connus. Les gains d'énergie et de GES obtenus après réhabilitation sont selon certains échantillons de l'ordre de 20 % pour des classes énergétiques E avant travaux, 30 % pour des F, 40 % pour des G mais restent imprécis. Au-delà des aides publiques mobilisables, les mesures nécessaires pour passer de 288 000 à 380 000 logements réhabilités/an ne sont pas identifiées⁹⁴.

Un sous-ensemble des logements est mieux cerné, celui des 50 000 logements aidés par l'ANAH dans le cadre du programme habiter mieux. L'animation locale dans le prolongement des anciennes opérations programmées d'amélioration de l'habitat donne de bons résultats.

On ne connaît pas encore bien l'impact des dispositions prises pour faciliter les réhabilitations dans les copropriétés.

Un débat récurrent porte sur l'intérêt de faire la réhabilitation en une seule fois plutôt que par tranches successives. Il semble que travailler par tranches successives ne soit qu'un peu plus cher qu'agir en une seule fois. La collecte d'éléments sur les coûts de passage d'une classe énergétique à une autre⁹⁵ permettrait d'objectiver ce débat. Mais les aspects non économiques sont aussi importants et renvoient à des modes mal

⁹⁴ Un rapport vient d'être remis au Plan Bâtiment durable qui émet 4 groupes de propositions, portant sur des approches systèmes, des messages plus ciblés mais au delà du seul aspect énergie (environnement, confort, patrimoine), cf Rapport « Nouvelles dynamiques de rénovation des logements », décembre 2016, <http://www.planbatimentdurable.fr/rapport-nouvelles-dynamiques-de-renovation-des-a1067.html>

connus de comportements et de prises de décisions des propriétaires et usagers. Dans ce contexte, les particuliers s'orientent majoritairement vers une réhabilitation par tranches, qu'il convient donc d'accompagner dans le moyen et long terme pour aller vers une rénovation énergétique plus complète.

2.2.2.3. Accompagner les particuliers

Le rapport de 2013 recommandait de s'appuyer sur les grands opérateurs pour fournir des offres clés en main aux particuliers. Les grands fournisseurs d'énergie ont été mis à contribution dès 2006 au travers des certificats d'économie d'énergie pour intervenir dans le domaine de l'efficacité et de la précarité énergétique.

Face au défi important de la rénovation, et à la difficulté de passage à l'acte en particulier des propriétaires individuels, il importe de baisser les coûts, fiabiliser les prestations, simplifier les démarches et actions, et accompagner les propriétaires, tant techniquement, qu'administrativement et financièrement, à l'instar des réussites des opérations programmées d'amélioration de l'habitat (soutenues par l'ANAH).

Ces indispensables évolutions souhaitées peuvent profiter des récentes réformes territoriales, de la montée en puissance des plate-formes locales de rénovation énergétique, de la mise en place, dans le cadre du plan de rénovation énergétique de l'habitat, de points rénovation information service (PRIS)⁹⁶, ainsi que d'efforts de renforcement de l'organisation et de la formation des filières professionnelles⁹⁷, avec une offre globale garantissant les résultats (par exemple par des groupements ou coopératives d'entreprises labellisés RGE).

5. Relancer la rénovation des logements existants par un accompagnement local individualisé technique, financier et pédagogique en ayant une démarche cohérente avec les perspectives de rénovation ultérieure et environnantes. Mieux apprécier la réalité des rénovations et prendre en compte le cycle de vie.

2.2.2.4. Les bâtiments tertiaires

La connaissance est ici aussi fragmentaire. L'institut français du bâtiment, qui regroupe plusieurs grands acteurs, défend la possibilité d'améliorations rapides organisationnelles, de régulation et comportementales permettant d'économiser 20 % de l'énergie, et de restaurations plus lourdes tous les 20 ans.

Un décret sur les obligations de rénovation dans le tertiaire devrait être prochainement signé. Il requiert sous réserve d'une rentabilité économique raisonnable -25 % de consommation énergétique à l'horizon 2020 et un plan de réduction à 40 % à l'horizon 2030.

⁹⁵ De telles matrices existent, cf. par exemple « Évaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements », collection études et documents n°58 du CGDD, novembre 2011, http://www.lepole.org/wp-content/uploads/2012/09/ED58_etudes1.pdf, ou les matrices élaborées par le CIRED sur base de donnée ADEME

⁹⁶ Selon la DGEC, 450 PRIS ont en 2015 conseillé 170 000 personnes. L'impact environnemental direct des PRIS en 2014 serait de 141 ktCO₂éq.

⁹⁷ Éventuellement dans une optique sinon d'industrialisation, mais au moins de systématisation

Les bâtiments publics d'État sont soumis à la directive européenne 2012/27/UE d'efficacité énergétique qui requiert une rénovation énergétique pour 3 % des bâtiments publics chaque année, ou dispositif équivalent⁹⁸. Ils seront aussi soumis au décret précité relatif aux obligations de travaux d'amélioration de la performance énergétique dans les bâtiments existants à usage tertiaire. L'État, après un effort de diagnostics à partir de 2008, a créé en 2016 une nouvelle direction de l'immobilier de l'État, mais n'affiche pas encore de stratégie claire en matière de réduction des émissions de GES de son patrimoine, renvoyant la fixation d'objectifs à l'élaboration de schémas directeurs immobiliers régionaux. Un groupe de travail sous pilotage France Domaine et réunissant les ministères travaille depuis début 2016 à la définition de la feuille de route pour la transition énergétique pour les bâtiments de l'État.

Les autres grands opérateurs, qu'il s'agisse des collectivités, des gestionnaires de surfaces commerciales ou de patrimoine bâti, des grandes foncières, etc. ont été, à l'exception des bailleurs sociaux, peu mis à contribution en matière de réduction des d'émissions de GES.

6. Mieux impliquer les propriétaires de patrimoines importants (État et ses établissements publics, Collectivités locales, Sociétés propriétaires de surfaces commerciales, entrepôts, hôtels, logements) dans des politiques de rénovation en leur fixant des objectifs de résultat.

2.2.2.5. Améliorer la connaissance du gisement d'économies de CO₂

Le rapport de 2013 préconisait d'améliorer cette connaissance et de tenir à jour les informations relatives au coût et à la rentabilité des travaux⁹⁹. Cette connaissance aiderait à refonder la réglementation sur l'existant et à déterminer le bon niveau de performance visé après réhabilitation. Elle devrait inclure des études et recherches sur les comportements, tant à la prise de décision de rénover énergétiquement que dans les usages des bâtiments.

2.2.3. Les bâtiments neufs

La réglementation thermique 2012 permet de construire des bâtiments peu consommateurs d'énergie et peu émetteurs de CO₂ dans leur phase de fonctionnement.

Le MEEM prévoit de faire évoluer cette réglementation en 2018 de façon à mieux prendre en compte les émissions de GES et la consommation d'énergie nécessitées par le reste du cycle de vie, notamment les phases de construction et de déconstruction. Cette évolution, anticipée par l'expérimentation en cours du label

⁹⁸ C'est-à-dire permettant d'aboutir à un gain énergétique équivalent

⁹⁹ Divers travaux en ce sens sont documentés dans les annexes, dont: les matrices de coûts de rénovation d'une classe énergétique à l'autre (CGDD: http://www.lepole.org/wp-content/uploads/2012/09/ED58_etudes1.pdf et CIRED: <http://intra.daei.sg.i2/les-politiques-mises-en-place-pour-ameliorer-la-a4321.html>); et les courbes de coût d'abattement des mesures (CGDD, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Trajectoires%20de%20transition%20bas%20carbone%20au%20moindre%20co%C3%BBt.pdf>)

Energie carbone attribué à des bâtiments plus performants que requis par la RT 2012 et prenant en compte performance énergétique et environnementale, devrait par exemple favoriser l'usage de matériaux biosourcés, comme le bois, à condition que les filières industrielles et professionnelles en ces domaines soient mieux organisées.

Les bâtiments à faible consommation d'énergie, pouvant aller jusqu'à la notion de bâtiments à énergie positive, prévus dans la nouvelle réglementation environnementale 2018 en préparation, participent de l'architecture passive et supposent dans un certain nombre de cas une autoproduction d'énergie au moyen d'énergies renouvelables décentralisées. Cette démarche pourrait s'étendre à l'échelle de groupements de bâtiments, quartiers et îlots urbains, selon des modalités qui restent à préciser dans les domaines des coûts directs et indirects et de la sécurité des réseaux locaux susceptibles de se constituer¹⁰⁰. De tels groupements peuvent empêcher l'accroissement de la consommation énergétique, et donc des émissions de GES à chaque construction neuve.

2.2.4. Nécessité d'une stratégie sous-tendue par la réduction observée des émissions

En conclusion, en raison de l'important potentiel du secteur bâtiment, encore loin d'être réalisé, il apparaît nécessaire de fiabiliser les données et mesures, d'améliorer la prise en compte des émissions directes et indirectes de GES dans le bâtiment neuf, d'accompagner et d'inciter au passage à l'acte en rénovation, en s'appuyant sur des initiatives locales.

2.3. L'énergie¹⁰¹

En 2013 et 2014, la production d'énergie a représenté respectivement 11,7 % et 9,5 % des émissions nationales de GES. Ce sont essentiellement la production d'électricité (19 Mt CO₂eq en 2014), le chauffage urbain (9 Mt) et le raffinage de pétrole (8Mt) qui contribuent à ces émissions¹⁰².

Les évolutions à court terme sont tracées par la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Son impact sur les émissions de GES, est selon l'étude d'impact mise en consultation, cohérente avec la SNBC qui prévoit une quasi stabilité pour l'ensemble du secteur entre 2013 et 2028, les émissions passant de 57 à 55 MtCO₂eq.

¹⁰⁰ L'ordonnance n° 2016-1725 du 15 décembre 2016 relative aux réseaux fermés de distribution prévoit un certain nombre de dispositions applicables aux réseaux qui alimentent un ou plusieurs consommateurs non résidentiels exerçant des activités de nature industrielle, commerciale ou de partages de services. Pour le secteur résidentiel il faut probablement établir des dispositions de même nature.

¹⁰¹ Pour plus de détails, voir annexe "La production d'énergie »

¹⁰² Année exceptionnellement chaude avec des émissions totales faibles du secteur de production d'énergie (43,6 MtCO₂eq au total). Les émissions en 2013 étaient de 56,9 MtCO₂eq au total pour le secteur.

2.3.1. La production d'électricité

La production d'électricité est très décarbonée en France comparée à celle d'autres pays grâce aux 75 % d'électricité d'origine nucléaire, 10 % hydraulique et 5 % d'autres renouvelables dans la production¹⁰³, y compris si l'on inclut les phases amont dans le cadre d'une analyse de cycle de vie¹⁰⁴.

Les évolutions en cours vont dans le sens du maintien d'une décarbonation élevée, avec en particulier la fermeture des centrales au fioul puis celle (progressive) des centrales à charbon qui sont les plus émettrices de GES et le développement des énergies renouvelables (ENR) pour produire de l'électricité, sous réserve de ne pas remplacer des centrales décarbonées par des centrales plus émettrices. Il faut également veiller à ce que la production d'électricité par des centrales thermiques et le développement des réseaux pour pallier l'intermittence des ENR ne pénalise pas le bilan carbone.

2.3.2. Le développement des ENR électriques et thermiques

Les ENR représentent en 2015 15 % de la consommation d'énergie brute finale¹⁰⁵ (contre 9 % en 2005), avec pour objectif ambitieux¹⁰⁶ d'atteindre 23 % en 2020. Les objectifs de la PPE visent à augmenter de plus de moitié la capacité électrique et la production thermique renouvelable, mais à l'horizon 2023.

En production électrique, la PPE programme les réalisations possibles des prochaines années. Le rapport de 2013 préconisait une action pédagogique sur l'énergie éolienne terrestre et était dubitatif sur le photovoltaïque. Aujourd'hui les ENR se développent fortement mais suscitent parfois des oppositions locales. Les objectifs de la PPE sont ambitieux avec de 21,8 à 26 GW en éolien terrestre, 3 GW en éolien en mer posé, et entre 18,2 et 20,2 GW en photovoltaïque, passant ainsi de 41 GW en 2014 à 71-78 GW en 2023. La maturité technique et économique de certaines filières de production permettra de les réintégrer à brève échéance dans le fonctionnement du marché de gros et de réserver aux filières émergentes les plus prometteuses les modalités d'aides les plus coûteuses pour la collectivité comme les tarifs de rachat.

En matière de biocarburants, dans le contexte d'un taux actuellement plafonné de 7 % de biocarburants de première génération, la PPE prévoit des pourcentages indicatifs d'incorporation obligatoires de biocarburants avancés allant jusqu'à 3,4 % en 2023 pour l'essence. Les biocarburants avancés sont retenus dans certains scénarios pour diminuer les émissions de GES des transports et sont préférables aux biocarburants de première génération pour des raisons de conflit d'usage des terres et aussi sans doute de bilan carbone.

¹⁰³ 69g/kWh en 2011 à comparer à une moyenne de l'UE à 28 de 350. Voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_du_climat_2016.pdf

¹⁰⁴ Selon le rapport d'évaluation environnementale de la PPE page 45, les facteurs d'émission (amont et production, mais pas aval) sont 6g/kWh pour le nucléaire et l'hydraulique, 7 g pour l'éolien, 45 g pour la géothermie, 55g pour le PV, 418g pour une centrale gaz etc.

¹⁰⁵ Et 17 % de la production d'énergie primaire

¹⁰⁶ La tendance actuelle amenant à 20 ou 21 % en 2020

En matière de biogaz, la PPE prévoit en 2023 1 Mtep pour la cogénération et 0,6 Mtep pour le biométhane injecté dans le réseau gaz en limitant le biogaz à partir de cultures dédiées.

Enfin, en matière de chaleur, la PPE affiche un objectif de 17,2 à 19 Mtep de chaleur renouvelable en 2023 contre 12,6 Mtep en 2014 ; elle prévoit notamment de passer de 10 Mtep pour le bois chaleur actuellement à 12 Mtep en 2018 et 14 Mtep en 2023 et pour les pompes à chaleur (PAC) de 1,6 Mtep en 2013 à 2,2 Mtep en 2018 et 3 Mtep en 2023. Les réseaux de chaleur alimentés par la biomasse progressent moins rapidement qu'escompté.

2.3.3. Des progrès possibles grâce à des réseaux intelligents

L'intermittence de la production d'électricité par les ENR, sa décorrélation des pics de consommation, et son caractère réparti sur le territoire amènent à davantage s'intéresser aux questions de gestion du réseau, d'effacement et de stockage.

La gestion du réseau repose notamment sur le déploiement de compteurs intelligents et de moyens de communications bidirectionnels fournisseurs-clients, qui pourraient permettre de mieux gérer les pointes de production et de consommation par le jeu combiné d'une tarification différente suivant les heures de la journée et d'un pilotage à distance ou programmé des consommations.

Les dispositifs de stockage, permettant des stratégies de stockage de l'électricité complémentaires de la gestion des réseaux, vont fortement évoluer avec des coûts de stockage dans les batteries divisés par 2 dans les cinq prochaines années¹⁰⁷, le développement potentiel de la voiture électrique, sans évoquer les techniques de transformation de « *power to gas* ». Plus traditionnellement, existent déjà aujourd'hui les chauffe-eau électriques à accumulation et les radiateurs électriques à inertie.

Dans ces conditions, la production décentralisée sous forme d'auto-production et d'auto-consommation, favorisée par la baisse des coûts de production d'énergie renouvelable et encouragée par une réglementation du bâtiment qui tend vers l'« énergie positive¹⁰⁸ » en 2018 pour le neuf, peut devenir dans le secteur du bâtiment¹⁰⁹ une solution pertinente pour les « îlots urbains » (groupes de bâtiments, quartiers), voire l'habitat diffus en cas de très faibles puissances. De premiers cadrages sont en cours d'élaboration et demandent à être développés.

¹⁰⁷ Pour mémoire des ordres de grandeur pour les batteries lithium-ion sont : 1000 \$/kWh en 2010, 600 \$ en 2012, 540 en 2014, 410 en 2015. Cf par exemple <http://www.ecoco2.com/blog/11943-batteries-lithium-ion-la-chute-des-prix-saccentue>

¹⁰⁸ En fait il s'agit de très basse consommation d'énergie, typiquement moins de 40 kWh d'énergie primaire par m² et par an, compensée par une production renouvelable

¹⁰⁹ Elle l'est aussi pour les secteurs tertiaire, agricole, industriel, et les zones non interconnectées (ZNI)

7. Préciser les conditions techniques, réglementaires, juridiques, économiques et fiscales de l'auto-production et auto-consommation d'énergie, notamment dans le contexte de l'émergence des énergies renouvelables intermittentes et des problématiques de stabilité et de sécurité des réseaux, et dans le cadre de la généralisation des bâtiments à énergie positive prévue dans la réglementation relative aux bâtiments, et lancer des expérimentations correctement suivies.

2.3.4. Adaptation de et à la demande

Une bonne façon de diminuer les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité est de chercher à diminuer la thermosensibilité de la consommation électrique et spécialement la pointe journalière correspondante dans la mesure où l'électricité est alors partiellement produite par des centrales thermiques.

L'apport possible de l'outil tarifaire dans cette politique peut faire l'objet de recherche complémentaire sur les élasticités de consommation d'autant plus que des techniques de gestion active de l'énergie dans les bâtiments se développent.

Quant aux émissions liées à la production de chaleur et au raffinage, l'un des enjeux est de rendre compétitives les énergies non carbonées et en particulier celles issues de la biomasse par rapport aux hydrocarbures. Une stratégie nationale de mobilisation de la biomasse est en cours d'élaboration par la DGEC, permettant d'identifier des mesures permettant de mieux concilier offre et demande de biomasse aux échéances de la PPE. Outre la mobilisation de la biomasse, une utilisation intelligente de la fiscalité carbone, lissant dans une certaine mesure les variations brutales à la baisse des hydrocarbures, peut y contribuer.

Il faut enfin anticiper suffisamment tôt le déploiement annoncé des véhicules électriques, importants vecteurs de décarbonation du secteur des transports à condition que l'électricité supplémentaire appelée soit décarbonée.

2.4. L'industrie¹¹⁰

En 2014, le secteur de l'industrie représentait 18,5 % des émissions de GES hors UTCF, en diminution de près de 40 % depuis 1990. Un quart de cette diminution s'explique par une baisse de la production industrielle.

La SNBC prévoit une poursuite de la diminution sensible des émissions du secteur industriel, qui passeraient de 148 Mt CO₂eq en 1990 et 88 Mt CO₂eq en 2013 à 68 MtCO₂eq en moyenne dans le dernier budget carbone 2024-2028.

Une partie importante des émissions industrielles, représentant 67,5 Mt CO₂eq pour 950 sites, est soumise au système européen d'échange des quotas d'émissions (SEQUE). Ces implantations devraient en moyenne réduire leurs émissions de 43 % en 2030 par rapport à 2005, ce qui conduirait en supposant que ces sites représentaient en 2005 la même proportion des émissions qu'aujourd'hui à des émissions de 51

¹¹⁰ Pour plus de détails, voir annexe « L'industrie (hors secteur de production d'énergie) »

MtCO₂eq. C'est dire l'importance d'une réforme réussie de ce mécanisme et d'une distribution réaliste de quotas.

Les scénarios prospectifs divergent quant aux efforts demandés à l'industrie à long terme. Ils sont surtout exprimés en termes de consommation d'énergie. Pour les quatre scénarios DEC, DIV, EFF et SOB, partant de 37 Mtep en 2010, on aboutit à des chiffres variant de 37 à 21 Mtep en 2050. Dans sa vision 2030-2050¹¹¹, l'ADEME aboutit (pour l'industrie hors déchets) à 73 Mt CO₂eq en 2030 et 54 MteCO₂ en 2050 (pour 129 MtCO₂eq en 1990).

Les moyens de diminuer les émissions de GES sont connues dans leur principe. Le Royaume-Uni¹¹² en identifie trois principaux, l'efficacité énergétique, le recours à la biomasse comme source d'énergie, et enfin la capture et le stockage du carbone.

Une étude secteur par secteur fait apparaître des différences sensibles entre les secteurs. Les gains énergétiques possibles dans le secteur agro-alimentaire (30 % d'ici 2030 selon l'ADEME) sont plus importants que ceux réalisables dans le secteur de la chimie (18 %) ou dans celui des métaux ferreux (7,5%). Une approche fine par site demeure indispensable, surtout pour les sites qui sont les plus gros émetteurs¹¹³.

Les déchets doivent être minimisés, ou valorisés énergétiquement, ou recyclés. Le développement du recyclage peut aussi permettre aussi des économies d'énergie et de matières premières. L'économie circulaire peut conduire à des volumes de production moindre d'objets manufacturés, diminuant proportionnellement les émissions de GES. Les scénarios prospectifs mentionnent rarement cette possibilité.

La capture et le stockage du carbone(CSC), technique à laquelle se réfèrent plusieurs scénarios de diminution des émissions de gaz à effet de serre pour l'industrie (y compris l'industrie de l'énergie) n'est pas aujourd'hui une technique totalement mature, que ce soit techniquement, économiquement ou du point de vue de l'acceptabilité. Les rapporteurs soulignent le besoin d'approfondir l'analyse du potentiel et des impacts de la technologie de capture et stockage (voire utilisation) du carbone et de travailler sur les technologies correspondantes pour être prêt à satisfaire une demande, qui existera lorsqu'un prix du carbone sensiblement supérieur au prix ETS aura été fixé. Le programme NER300 devait aider à financer des démonstrateurs de telles technologies mais a surtout financé des projets d'EnR. Il est prévu un nouveau fonds européen d'innovation en faveur des EnR, de la CSC et de l'industrie à basse intensité énergétique (voir annexe parangonnage).

8. Promouvoir la R&D, l'évaluation du potentiel et de l'acceptabilité, l'expérimentation, les pistes de facilitation économique et la pédagogie en matière de technologies décarbonées, notamment l'usage efficient des ressources, l'hydrogène et la capture et séquestration et l'utilisation du dioxyde de carbone, en utilisant notamment les possibilités offertes par le futur fonds démonstrateur européen.

¹¹¹ Voir <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

¹¹² Voir <https://www.gov.uk/government/publications/industrial-decarbonisation-and-energy-efficiency-roadmaps-to-2050>

¹¹³ Les 20 plus gros sites représentent une émission de 30 MteCO₂. Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Emissions-verifiees-de-2013-et.html>

2.5. Les transports¹¹⁴

Le transport est le secteur qui émet le plus de GES, près de 30 % du total des émissions. C'est le seul¹¹⁵ secteur dont les émissions aient crû depuis 1990.

La réalité est d'ailleurs encore plus émettrice que ce qui est retracé dans les documents français voire européen puisque les transports internationaux aériens et maritimes ne sont pas inclus dans les bilans nationaux fournis au titre de la CCNUCC. Les organisations internationales correspondantes, OACI et OMI, ne progressent que lentement en vue d'une maîtrise à terme des émissions de ces secteurs malgré des progrès récents. (*Cf supra*).

2.5.1. Une grande inertie du secteur

La croissance des émissions liées aux transports s'explique par une augmentation des circulations du transport routier, en particulier des circulations de véhicules particuliers (VP) et véhicules utilitaires légers (VUL), la circulation des poids lourds stagnant depuis 2010. Cette augmentation des circulations n'est pas compensée avant 2003 par une augmentation de l'efficacité énergétique des véhicules. De plus, les bas prix des carburants observés depuis mi-2014 ont fait que les consommations de carburant sont reparties à la hausse, et les émissions de GES également.

Face à ce constat, la SNBC peut sembler ne demander que des efforts modérés au secteur des transports pour les prochaines années de 136 Mt CO₂éq en 2013 à 96 Mt CO₂éq en moyenne dans le dernier budget carbone 2024-2028 soit environ -30 % par rapport à 2013 contre -53 % pour le bâtiment. Mesuré par rapport au scénario tendanciel, l'écart entre ces deux secteurs est toutefois bien moindre : -27 % pour les transports contre -34 % pour les bâtiments. Et les transformations du secteur des transports sont lentes.

La SNBC énumère les pistes connues de maîtrise des émissions de GES dans le secteur : maîtrise de déplacements, taux de remplissage et covoiturage, efficacité énergétique, contenu carbone des vecteurs énergétiques, report modal. Elle conclut à la nécessité d'actionner tous les leviers disponibles et alerte sur l'inertie du secteur, le « lock in » constitué par le parc routier en 2050 et qui démarre dès 2030, et la nécessité d'un signal clair à court terme.

2.5.2. Leviers

2.5.2.1. Maîtrise des déplacements.

La demande de transport de marchandise à courte distance est très liée aux nouveaux systèmes de commerce qui se mettent en place (commerce électronique, développement des livraisons, supermarchés en centre-ville), et aux réglementations liées à la pollution de l'air qui influenceront sur ces déplacements. Il est difficile de prédire aujourd'hui l'effet global de ces évolutions.

¹¹⁴ Pour plus de détails, voir annexe « Transports »

¹¹⁵ Avec le traitement de déchets, si ce secteur est isolé

Les déplacements de voyageurs sont pour les 2/3 des km parcourus des déplacements de courte distance, liés au quotidien. Ils sont conditionnés par l'offre de logement, la mixité des fonctions urbaines, la facilité à optimiser son lieu de résidence. Ils sont liés aux choix urbanistiques, aux prix des logements, à la taxation du foncier et des mutations, voir à des nouvelles formes d'organisation comme le télétravail ce qui suggère des leviers indirects d'action.

Un autre déterminant fort de la demande de transport est bien entendu le prix des carburants, et donc leur taxation. La recommandation du rapport de 2013 d'inclure des carburants dans le système SEQE semble trop compliquée par rapport à un système de taxe fondée sur le contenu carbone des différents vecteurs énergétiques.

2.5.2.2. Taux de remplissage, covoiturage

L'augmentation du taux de remplissage, souvent évoquée, semble surtout réduire les émissions sur les courtes distances.

L'augmentation du taux de remplissage sur le transport routier de marchandises longue distance renvoie au « 44t » dont les effets environnementaux ont fait l'objet d'appréciations controversées du fait du possible contre-report modal.

Sur le transport de voyageurs, le covoiturage est en pleine expansion, son développement étant permis par les nouvelles techniques de l'information et de la communication. Selon une étude, sur des longues distances, le bénéfice n'est pas significatif, car la baisse du coût a un effet rebond ou reporte des déplacements en train vers le covoiturage. Sur de courtes distances le bénéfice peut être significatif. Des incitations en termes de partage de la voirie sont concevables. À moyen terme, les véhicules serviciels autonomes offrent une alternative intéressante aux transports collectifs dans certaines zones. Enfin le véhicule partagé, dans sa modalité autopartage en boucle, peut avoir des bénéfices significatifs, à la différence de l'autopartage en trace directe.

2.5.2.3. Efficacité énergétique des véhicules

L'indispensable amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules et la réglementation européenne relatives aux émissions de CO₂, combinée à un système de bonus/malus (avec au moins autant de malus que de bonus) sont sans doute les seules mesures qui aient été efficaces ces dernières années pour contenir l'augmentation des émissions de GES des transports, sous réserve de tests d'émissions fiables. C'est un outil approprié pour donner le signal requis pour éviter le « lock in » précité.

La réglementation européenne doit aller plus loin : objectif sur les VP pour 2025-2030, réglementation sur les VUL, réglementation sur les PL, meilleures correspondances entre les émissions mesurées par les tests et les émissions en conditions réelles de circulation.

9. *Généraliser une réglementation des émissions des GES des véhicules s'appuyant sur des mesures représentatives de leurs conditions d'utilisation et en intégrant les émissions survenant dans la phase de construction/déconstruction. Adopter un niveau d'ambition élevé pour la réduction des émissions unitaires.*

Les pouvoirs publics peuvent encourager ces évolutions en obligeant certaines flottes (administrations, taxis, distributeurs...) à comporter un certain pourcentage de véhicules faiblement émissifs, comme le prévoit la LTECV, ou en mettant en place des mesures de circulations ciblant ces véhicules, ce qui amène le sujet de la transition du parc de véhicules thermiques vers des véhicules peu ou pas émissifs.

Technologiquement, les progrès important prévisibles dans le domaine des batteries font des véhicules électriques (cf. *infra*), et des véhicules hybrides rechargeables des véhicules intéressants dans les pays où l'énergie électrique est décarbonée. Les disparités de situation entre pays européens rendent cependant difficile une approche communautaire sur ce sujet. Dans ces conditions, une politique française de promotion du véhicule électrique ou hybride rechargeable a donc toute sa place.

2.5.2.4. Contenu carbone des vecteurs énergétiques

Les vecteurs énergétiques (essence, diesel, gaz, hydrogène, biocarburants) ne peuvent pas être considérés indépendamment de leur impact sur la qualité de l'air, qui explique les réticences actuelles vis-à-vis du moteur diesel qui émet des particules fines nocives pour la santé.

Le gaz naturel est un vecteur moins émetteur que l'essence, même si cela peut être nuancé lorsque l'on raisonne du puits à la roue. Le gaz naturel reste, malgré ses inconvénients en termes de pollution, intéressant, car il peut être à terme produit sous forme de biogaz (GNV). Il paraît notamment adapté pour les transports à longue distance de marchandises ou pour certaines motorisations de transport collectifs ou de livraisons de marchandises en ville. Il est considéré dans certains scénarios comme intermédiaire indispensable à une transition vers des transports décarbonés, mais il peut dans certains cas aussi freiner des scénarios plus décarbonés, notamment pour les VL (véhicule électrique, véhicule à hydrogène).

L'hydrogène est un vecteur multi-usages qui présente un potentiel, requiert infrastructures et véhicules adaptés, et est favorable en termes d'émissions s'il est produit de manière décarbonée (électrolyse) ce qui n'est pas le cas actuellement.

Les biocarburants produits via des cultures dédiées ont des bilans globaux controversés si l'on prend en compte l'UTCF, d'où l'intérêt de travailler plutôt sur les biocarburants avancés, de seconde voire de troisième génération si leur bilan global est favorable et de les mettre en œuvre dès lors que les filières sont matures.

2.5.2.5. Le report modal

Les politiques de report modal décidées par les pouvoirs publics ont eu du mal à se concrétiser s'agissant du développement du fret ferroviaire. La voie d'eau a en revanche connu un développement modéré.

Un enjeu fort correspond aujourd'hui aux déplacements urbains, avec le développement du vélo, les investissements réalisés en matière de transport collectif urbain en site propre (avec des limites budgétaires et liées aux rendements décroissants toutefois), la tarification et les restrictions du stationnement, l'usage de la voirie, les véhicules partagés, éventuellement autonomes. Les agglomérations ont les outils d'une politique globale, dont l'un des objectifs peut être la diminution des émissions de GES.

2.5.3. Deux sujets clés

2.5.3.1. Le véhicule électrique

L'électricité est un vecteur d'énergie prometteur pour les transports d'une part parce que la production d'électricité peut être décarbonée (et de fait l'est en France) et d'autre part parce que la motorisation électrique est propre et génère peu de pollutions de proximité affectant la qualité de l'air. Le prix à payer en termes d'émissions est le carbone gris nécessaire à la fabrication de la batterie (la moitié de l'énergie nécessaire à la fabrication d'un VE est dévolue à la batterie) mais en analyse en cycle de vie le bilan est largement favorable au VE voire, dans une moindre mesure, au véhicule hybride rechargeable¹¹⁶, qui peut faciliter la transition vers le VE), pourvu que son alimentation électrique soit décarbonée.

Les conditions de développement du véhicule électrique s'améliorent encore grâce aux progrès actuels des batteries en termes de performance et de coûts, à une prise de conscience des effets sanitaires des pollutions de proximité, à une réglementation durcie sur les émissions des GES des véhicules, à une fiscalité renforcée sur l'énergie carbonée, à l'engagement de quelques constructeurs en faveur du véhicule électrique, au développement de l'utilisation des véhicules par des conducteurs qui n'en sont pas propriétaires.

Les pouvoirs publics, tout en conservant une neutralité technologique et en exprimant leurs exigences sous forme de critères de performance, de facilitation et d'incitations, peuvent accélérer cette mutation. Notamment dans les centre-villes, où le VE se développe plus difficilement qu'en périurbain et à la campagne, du fait notamment des complexités de l'accès à la prise en immeuble collectif.

¹¹⁶ En ordre de grandeur, un véhicule thermique émet dans son cycle de vie plus de deux fois plus qu'un VE, et un VHR émet moitié plus qu'un VE. Ces ordres de grandeur restent très dépendants des hypothèses prises.

10. Développer la décarbonation des transports, notamment par maîtrise de la demande, fiabilisation des mesures et contrôles d'émission y compris lors du cycle de vie, électrification (incitations à l'acquisition de tels véhicules et réalisations d'infrastructures de recharge accessibles et intelligentes), et, s'ils s'avèrent avoir un bilan positif en matière d'émissions de GES, par l'utilisation des biocarburants liquides ou gazeux de seconde ou troisième génération.

2.5.3.2. TIC

Les technologies de l'information et de la communication sont susceptibles d'avoir un impact important sur le secteur des transports. Elles concourent au développement du véhicule autonome, à une amélioration de son efficacité énergétique, au partage de l'usage des véhicules, à une meilleure utilisation des infrastructures, à des transferts intermodaux facilités, à un meilleur suivi des déplacements, etc. mais aussi à une croissance des déplacements.

Des programmes de recherche dans ce domaine peuvent être envisagés dans le cadre des investissements d'avenir.

11. Promouvoir de nouvelles formes de mobilité efficaces et faiblement émissives en milieu urbain, en s'appuyant, si leur impact favorable est avéré, sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication.

3. Les problématiques transversales

Ce chapitre examine les interactions entre secteurs, et approfondit plusieurs thématiques transversales : la recherche et le développement, l'économie circulaire, le développement des produits bio-sourcés, l'énergie 2.0, l'artificialisation des territoires, les comportements.

3.1. De nombreuses interactions entre les secteurs

La partition des émissions entre différents secteurs gomme les interdépendances entre ceux-ci, qui peuvent constituer des voies d'amélioration et de progrès intéressantes. Le tableau ci-après en identifie quelques-unes :

	Agriculture	Bâtiment	Déchets	Énergie	Industrie	Transports	UTCF
Agriculture		Bioressources et biomatériaux (bois, chanvre) de construction Schémas d'urbanisation, villes vertes	Lutte contre gaspillage	Biogaz Biomasse biocarburants isolants organiques	Bioressources biomimétisme des procédés	Biocarburants	Éco-agriculture Captation carbone dans les sols exploitation forestière, bois matériau
Bâtiment	Agriculture verticale efficacité énergétique des bâtiments		Recyclage des produits du bâtiment	Bâtiment à énergie positive Économies d'énergie Énergie 2.0	Efficacité énergétique des bâtiments	Concentration/Étalement urbain Prises pour véhicules électriques Garage des véhicules et deux roues	Urbanisation Construction bois biomatériaux de construction
Déchets	Amendements organiques	Recyclage des matériaux de construction		Valorisation énergétique réseaux de chaleur	Économie circulaire CSC	Recyclage	Épandage Sols pollués Déchets bois
Énergie	Efficacité énergétique des	Efficacité énergétique du bâtiment	Efficacité énergétique des		Économies d'énergie Écoconception	Économies d'énergie Changement	Bois-énergie

	appareils	gestion intelligente autoproduction/autococonsommation	processus d'incinération		des produits	des vecteurs d'énergie du transport Biocarburants	
Industrie	Désindustrialisation de l'agriculture exploitation forestière	Standardisation, préfabrication	Processus de traitement économie circulaire : produits réparables, recyclables, pièces	Exploitation de la chaleur fatale des processus processus optimisés pour production de batteries industrialisation et baisse des coûts EnR		Logistique Fret Commerce e-commerce	Artificialisation des terres Friches urbaines
Transports	Agriculture de proximité exploitation forestière	Lutte contre étalement urbain, artificialisation	Logistique optimisée	Utilisation des VE comme moyens de stockage	Optimisation de la logistique		Biocarburants
UTCF	Rotations, assolements, reforestation, artificialisation	Gestion foncière	Gestion des déchets agricoles et forestiers	biomasse	Industrie agricole et forestière	aménagement	

Tableau 5 : Interdépendances entre secteurs ; une cellule indique l'influence de la rubrique « ligne » sur la rubrique « colonne » – Source : mission

3.2. La R&D

La recherche et le développement, évoqués en 2.2.1, apparaît indispensable pour faire mieux que la trajectoire « *business as usual* » dont on a vu qu'elle ne permettait pas d'atteindre le « facteur 4 ». Les progrès réalisés ces dernières années, parfois à grands frais, dans le domaine des EnR et des batteries (coûts et performances), les défis à venir en matière d'agro-écologie, de biocarburants avancés, de nouveaux vecteurs énergétiques (hydrogène), de gestion de l'énergie illustrent la nécessité d'un effort dans ce domaine.

Les progrès ne sont pas uniquement technico-économiques, l'effort de recherche doit également se renforcer sur les comportements et l'acceptabilité (cf. *infra*).

La question de la capture et du stockage du carbone mérite un effort particulier en tant que technologie permettant de boucler maints scénarios prospectifs.

3.3. L'économie circulaire

L'objectif de l'économie circulaire est de produire des biens et des services tout en limitant la consommation et le gaspillage des matières premières, de l'eau et des sources d'énergie. L'idée de base est de réutiliser au maximum les matières premières utilisées pour la fabrication des produits¹¹⁷, en abandonnant la logique « extraire fabriquer consommer jeter ». L'économie circulaire conduit à s'intéresser à la conception des produits pour limiter la quantité de matières premières nécessaires et faciliter leur réutilisation. Elle pousse à raisonner fourniture de service plutôt que vente d'objets pour utiliser au mieux les produits. Elle débouche ainsi sur l'économie du partage et peut-être sur une sobriété accrue au niveau global. L'économie circulaire conclut naturellement par ailleurs à l'intérêt d'utiliser des bio-ressources. Ses concepts sont mobilisés pour l'atteinte du facteur 4 dans diverses projections, dont celles de la SNBC.

L'impact d'une telle approche sur les émissions de GES fait l'objet d'estimations allant de 15 à 83% de réduction d'émissions¹¹⁸, ce qui est considérable et mérite approfondissement.

3.4. Le développement des produits biosourcés

Le développement des produits bio-sourcés correspond à un enjeu important, que ce soit pour la production d'énergie ou comme matériaux de construction. Il peut occasionner une concurrence entre production de biomasse non alimentaire et production alimentaire. Le recours à la biomasse est corollaire de certains scénarios ambitieux.

Ainsi, les scénarios EFF et SOB déjà cités prévoient respectivement 33 et 36 Mtep de biomasse en énergie primaire pour une consommation finale d'énergie de 78 et 72 Mtep en 2050.

Par ailleurs, le potentiel de développement des matériaux bio-sourcés dans l'habitat et la chimie verte est prometteur. Ces matériaux ont leur place dans la solution « nouvelle ressource » qui est l'une des neuf solutions industrielles françaises retenue par le ministère de l'industrie dans le cadre du plan « industrie du futur ».

Le rapport de 2013 mettait l'accent sur la méthanisation des effluents agricoles et sur la mobilisation du bois. Presque quatre ans après, la production des méthaniseurs demeure modeste¹¹⁹, tandis que la France peine toujours à produire plus de bois¹²⁰.

¹¹⁷ Dans l'industrie cela renvoie par exemple au concept d'« industrie 4.0 », usines intelligentes, adaptables et utilisant efficacement les ressources

¹¹⁸ Voir https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Note-de-Synthese_FR_Growth-Within.pdf http://www.institut-economie-circulaire.fr/Etude--L-economie-circulaire-une-trajectoire-cle-pour-la-lutte-contre-le-dereglement-climatique_a933.html <http://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/06/ircle-economy-ecofys-2016-implementing-circular-economy-globally-makes-paris-targets-achievable.pdf.pdf>

¹¹⁹ Voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Tableau_de_bord_biogaz_-_Deuxieme_trimestre_2016.pdf

¹²⁰ Voir <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/bois2016T1bssef.pdf>

Le cas du bois est particulièrement emblématique. La France dispose de ressources considérables mais la filière (exploitation, transformation), hétérogène et insuffisamment structurée, est améliorable. Le bois est à la fois un matériau, éventuellement recyclable, capable de stocker le carbone, et en fin de cycle une source d'énergie. Il y a un enjeu fort à ce que les actions du contrat de filière du comité stratégique de la filière bois¹²¹ réussissent. Le développement des produits biosourcés est donc à encourager.

3.5. L'énergie 2.0

Le vocable d'énergie 2.0, regroupe plusieurs évolutions :

- celle de l'utilisateur d'énergie, qui devient acteur de sa consommation d'énergie, à qui il convient d'en expliquer les enjeux et les possibilités d'économie en termes simples, voire qui va produire et/ou stocker tout ou partie de l'énergie dont il a besoin ;
- celle du rôle des distributeurs et fournisseurs d'énergie, qui optimisent leurs réseaux et doivent maintenant aider leurs clients à viser l'efficacité énergétique et l'optimisation des profils de consommation ;
- celle de l'utilisation d'internet pour observer les consommations, les réguler, les agréger et commander les appareils qui consomment de l'énergie (bâtiments ou véhicules), voire les équipements qui la produisent, la transportent et la stockent.

Partant d'une conception « *top down* » du fournisseur cherchant à vendre un maximum d'énergie au consommateur, on évolue peu à peu vers une conception décentralisée des systèmes énergétiques, dans lesquelles les autorités locales ont un rôle de facilitateur et de planificateur, dans laquelle l'utilisateur final a un rôle plus important pour réaliser des économies d'énergie, choisir ses vecteurs énergétiques, voire produire et stocker de l'énergie en étant auto producteur et auto consommateur.

Cette évolution doit faciliter la réalisation de scénarios fondés sur la sobriété et l'efficacité, en donnant davantage conscience à l'utilisateur final de son impact et de ses possibilités d'action.

Elle nécessite de la part des pouvoirs publics des efforts d'anticipation pour :

- préciser la maille territoriale pertinente pour mettre en œuvre le concept de territoire à énergie positive (îlots urbains, tertiaire, site agricole ou industriel, ZNI) ;
- inciter notamment via la structure de tarification, la fiscalité et les certificats d'économie d'énergie à la réalisation d'économies d'énergie et la diminution des émissions de gaz à effet de serre chez les consommateurs finaux ;
- préciser encore les conditions techniques, organisationnelles, tarifaires, économiques et fiscales relatives à l'auto-production et l'auto-consommation ;

¹²¹ Voir <http://www.entreprises.gouv.fr/conseil-national-industrie/la-filiere-bois>

- mener des expérimentations dans ces domaines et encourager la pédagogie (diffusion de bonnes pratiques, (in)formations, etc.).

3.6. L'artificialisation des territoires

L'artificialisation des territoires (+600 km²/an en France) est considérée comme dommageable sur le plan de l'environnement selon une étude de 2012 de la Commission européenne¹²². Le changement d'affectations de terrains agricoles ou naturels pour construire des logements ou des infrastructures et bâtiments nécessaires à la production de biens et services a plusieurs conséquences : suppression des puits de carbone, imperméabilisation des sols, rupture des continuités écologiques, disparition de terres agricole, dégradation de la qualité de l'air et de l'eau. Ses causes en France sont notamment l'augmentation de la population et de ses moyens, la réduction de la taille des foyers, l'appétence pour l'espace et la vie à la campagne, les prix du foncier et de l'immobilier.

En France les zones urbanisées couvrent 8,8% du territoire métropolitain avec 5,6 millions d'hectares en 2014 (34% de plus qu'en 1990) avec un impact estimé de 11,5 MtCO₂eq¹²³.

Le rapport de 2013 regrettait cet « éclatement urbain » dont il relevait un certain nombre de causes et notait qu'il renforçait les obstacles sociaux à l'indispensable augmentation des prix des combustibles fossiles. Dans le système de prix actuel, ses recommandations (politique foncière, fiscalité, plans d'aménagement) restent valides mais sont peut-être insuffisantes.

3.7. Comportements

Le rapport de 2013 observait que les scénarios de prospective décrivaient des évolutions technologiques mais considéraient comme allant presque de soi l'évolution des comportements correspondants. L'opposition locale à certaines technologies (par exemple EnR, stockage géologique) montre qu'il n'en est rien.

Le rapport de 2013 signalait par exemple les températures excessives dans les bâtiments, la recherche d'un confort automobile se traduisant par des voitures lourdes et puissantes et l'émergence de nouvelles formes de mobilité permises par le développement d'internet.

Cette problématique des comportements peut être élargie aux choix en matière d'alimentation (labels locaux mais achat de produits transformés et consommation hors foyer¹²⁴), de consommation (réutilisation d'objets mais consommation dictée par la mode), etc.

Le rapport 2013 recommandait de développer les recherches sur les comportements réels vis-à-vis des paramètres environnementaux. Il est probablement préférable

¹²² Voir par exemple http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/guidelines/pub/soil_fr.pdf

¹²³ Rapport national 2016 d'inventaire de la France au titre de la CCNUCC

¹²⁴ Voir <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/doctravail50112.pdf>

d'élargir le spectre des études à l'ensemble des paramètres significatifs des prises de décision. Les préoccupations d'économie, d'utilisation des possibilités offertes par la technologie, de confort, d'écologie, de sécurité, et de lien social impactent les politiques de l'énergie, des transports, du logement, de l'urbanisation.

Le rapport de 2013 recommandait également d'engager des programmes importants de sensibilisation des « corps intermédiaires » des professionnels en contact avec le public sur les moyens de réduire les émissions de GES. Cette recommandation apparaît très pertinente au moment où l'on souhaite que le concitoyen soit davantage acteur du changement. Dans le même esprit, le développement d'informations ciblées sur les émissions et de comparaisons entre produits est souhaitable.

Le rapport de 2013 remarquait enfin que les évolutions sociales se produisent lorsque la société en comprend l'utilité en termes concrets et qu'une offre nouvelle existe pour la faciliter. Il reste à travailler sur ces deux axes. Les études du Conseil économique, social et environnemental de 2015¹²⁵ montrent que nos concitoyens sont encore peu convaincus de la nécessité d'agir au niveau individuel. Parallèlement, il reste à développer des solutions compréhensibles, efficaces et abordables, notamment en matière d'alimentation, de logement et de mobilité. Les politiques publiques au niveau local, régional, national ont toute leur place dans ces évolutions souhaitables.

12. Renforcer la pédagogie en matière de : efficacité énergétique et sobriété ; lien entre consommation, processus, émissions et changement climatique ; déploiement des énergies renouvelables électriques (photovoltaïque, éolien...) et thermiques (biomasse, réseaux de chaleur, récupération...) ; possibilités d'agir au quotidien par changement de comportement ou passage à l'acte (transport sobre, rénovation, achat...) ; etc

¹²⁵ Voir <http://ve.lecese.fr/sondage-vivre-ensemble-le-changement-climatique/>

Conclusion

Près de quatre ans après la publication du rapport du CGEDD sur le facteur 4 en France, plusieurs facteurs favorables sont apparus dans la lutte contre les gaz à effet de serre :

- l'entrée en vigueur de l'Accord de Paris, qui traduit la volonté de tous les pays de lutter contre le changement climatique. L'objectif européen d'une diminution de 40 % des émissions en 2030 y participe ainsi que la LTECV et la SNBC.
- les progrès de la technologie qui se matérialisent par une diminution sensible des coûts de technologies clés (EnR, batteries...), diminution non anticipée dans de telles proportions il y a quatre ans. Ces progrès restent à renforcer.

Mais dans le même temps les émissions et concentrations de GES mondiales continuent d'augmenter. Les objectifs nationaux sont insuffisants. La mention du prix du carbone n'a pas été retenue dans le texte de l'accord de Paris. En France, la consommation énergétique stagne et les émissions reculent mais à un rythme encore insuffisant.

La plupart des recommandations du rapport de 2013 (observatoire du facteur 4, contribution carbone, taux d'effort régulier jusqu'en 2050, lutte contre la périurbanisation, gestion active des forêts, action dans le bâtiment visant les diminutions de GES en s'appuyant sur les grands opérateurs, pédagogie pour faire comprendre à l'opinion la nécessité d'une action locale, etc.) restent valables, quoique non nécessairement reprises dans le présent rapport d'actualisation, et peuvent parfois être complétées :

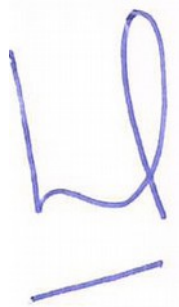
- une mise en œuvre réussie de l'Accord de Paris est indispensable ; l'impératif climatique amènera sans doute de nouvelles pratiques et activités à se développer ;
- des efforts de recherche restent nécessaires, car toutes les solutions ne sont pas encore disponibles ou matures ;
- l'agriculture, la forêt, les transports, le bâtiment et l'énergie décentralisée offrent des voies de progrès, souvent inter-sectorielles, pour lesquelles la France a des atouts (territoires, énergie décarbonée, potentiel de recherche) et qu'il faut expérimenter plus avant ;
- outre les questions technologiques, les aspects sociétaux, d'information, d'accompagnement et de gouvernance sont à approfondir.

En novembre 2016 un ambitieux paquet « une énergie propre pour tous les Européens » a été proposé par la Commission. Ce paquet, outre la réforme en cours du système ETS, ouvre une négociation de deux ans sur une bonne partie du corpus législatif pertinent en matière d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre. Un certain nombre de points sont sujets à débat, par exemple : biocarburants de première génération ou biocarburants avancés peut-être moins matures ; soutien ciblé aux filières d'énergies renouvelables ou appels d'offre technologiquement neutres ;

efficacité énergétique et son impact potentiellement négatif sur les prix du carbone ; soutiens à la rénovation sur la base d'économies réelles à partir d'un certain volume en raison des coûts de diagnostic ; remise en cause de la régulation des tarifs de l'électricité, etc. Il en résultera des évolutions des dispositifs européen et français, ce dernier étant déjà encadré par les orientations de la SNBC et de la PPE.

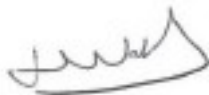
Quelles que soient ces évolutions, et en dépit des actions déjà entreprises, l'intensification des efforts est requise pour limiter le changement climatique à des niveaux qui ne modifient pas profondément l'environnement terrestre. Tous les acteurs doivent être mobilisés dans la durée.

Pascal DOUARD



Ingénieur général
des ponts, des eaux
et des forêts

Jean-Michel NATAF



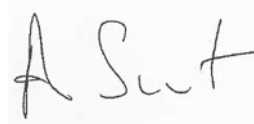
Ingénieur général
des ponts, des eaux
et des forêts

Gilles PIPIEN



Ingénieur général
des ponts, des eaux
et des forêts

Alain SAUVANT



Ingénieur général
des ponts, des eaux
et des forêts

Annexes

Annexes en volumes séparés

Annexe thématique sur l'agriculture et l'UTCF

Annexe thématique sur le bâtiment

Annexe thématique sur la production d'énergie

Annexe thématique sur l'industrie (hors secteur de production d'énergie)

Annexe thématique sur le parangonnage international UE, Royaume-Uni, Allemagne, Californie, Chine

Annexe thématique sur les transports

Annexes jointes

Note de commande

Annexe sur les formats des rapports d'inventaire d'émissions

Annexe sur les recommandations de 2013 et leur statut aujourd'hui

Annexe sur les points clés du débat en 2013 et leur statut aujourd'hui

Liste des personnes rencontrées

Glossaire

1. Note de commande

Référence CGEDD n°008378-02

Note de commande

**Actualisation des analyses sectorielles du rapport du CGEDD de 2013
relatif à la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050,
dans le contexte COP 21**

Programme 2016

Le Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) a produit, début 2013, le rapport collégial n°008378-01 intitulé "la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050".

Dans le contexte du suivi de la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) et de la 21^e conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015 (COP21), il apparaît opportun d'actualiser le rapport sus-mentionné, conformément au programme 2016-2017 du CGEDD.

La mission aura pour objet :

- d'actualiser les analyses du rapport de 2013 en prenant en compte les connaissances accumulées depuis, de lever certaines incertitudes et d'affiner les conclusions ;
- de relever les écarts entre analyses de l'époque et analyses actualisées et de faire évoluer si besoin la méthodologie de travail ;
- de faire un suivi des recommandations faites et d'examiner leur pertinence aujourd'hui, et d'améliorer le travail de prospective déjà effectué.

1- Actualisation des analyses

Le rapport de 2013 recourt à une approche par cinq secteurs (transports, industrie, agriculture et UTCF¹, bâtiment, énergie) complétée par une analyse de quatre questions intersectorielles: biomasse et CO₂, aménagement du territoire et urbanisme, énergie 2.0 et évolutions de comportement.

Les connaissances ont évolué depuis 2013, on peut notamment citer à ce titre le 5^e rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié en 2013-2014. La place du climat dans l'agenda politique a été confortée par le paquet énergie climat 2030 de l'Union Européenne, la conférence COP21 de Paris et par leur déclinaison nationale anticipée la LTECV, suivie de sa mise en œuvre au sein de la SNBC, de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) et du second plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC). Les données ont aussi évolué. Un exercice d'actualisation est donc souhaitable, tant des données que des analyses sectorielles et intersectorielles conduites.

2 - Analyse des écarts

Le retour sur le rapport de 2013 est aussi une occasion d'examiner la pertinence de son contenu après trois ans, d'infirmer les analyses prospectives conduites, et modifier le cas échéant la méthode d'élaboration du rapport.

Le rapport de 2013 examine 12 « points clés soumis au débat »², ceux-ci sont à réexaminer.

Un accent peut être mis sur les problématiques intersectorielles, difficiles à appréhender, mais nécessaires à prendre en compte en raison de la complexité des phénomènes et transferts mis en jeu. Une approche en termes de ruptures peut aussi être intéressante.

... / ...

1 Utilisation des terres, leur changement et la forêt

2 Nécessité d'une action rapide, empreinte carbone démentant le respect apparent des engagements d'émission, report à plus tard de l'effort dans les paquets climat énergie européens, valorisation du carbone, acceptabilité sociale des mesures de valorisation du carbone, non-unicité du prix du carbone, nécessité d'action sur les bâtiments existants, innovation bas carbone favorisée par la rente nucléaire, biomasse matériau, préparation immédiate à la peut-être rapide décarbonation des transports, comportements, observatoire de lutte contre le risque climatique

3 - Recommandations

Les 33 recommandations du rapport de 2013 seront examinées afin de déterminer si elles restent pertinentes et si elles ont reçu un début d'application. La mission proposera des recommandations nouvelles ou actualisées.

Le rapport est attendu pour fin 2016



Anne-Marie LEVRAUT

2. Les formats des rapports d'inventaires d'émissions

2.1. Des périmètres et hypothèses diverses

L'une des difficultés dans la prise en compte des rapports d'inventaires d'émissions de gaz à effet de serre (et autres polluants) est la diversité des formats utilisés et leur évolution dans le temps. Ces formats ne recouvrent pas nécessairement les mêmes périmètres ou ne font pas nécessairement les mêmes hypothèses sur les données, ce qui peut mener à des erreurs d'interprétation.

Ces formats sont décrits par exemple en <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions>.

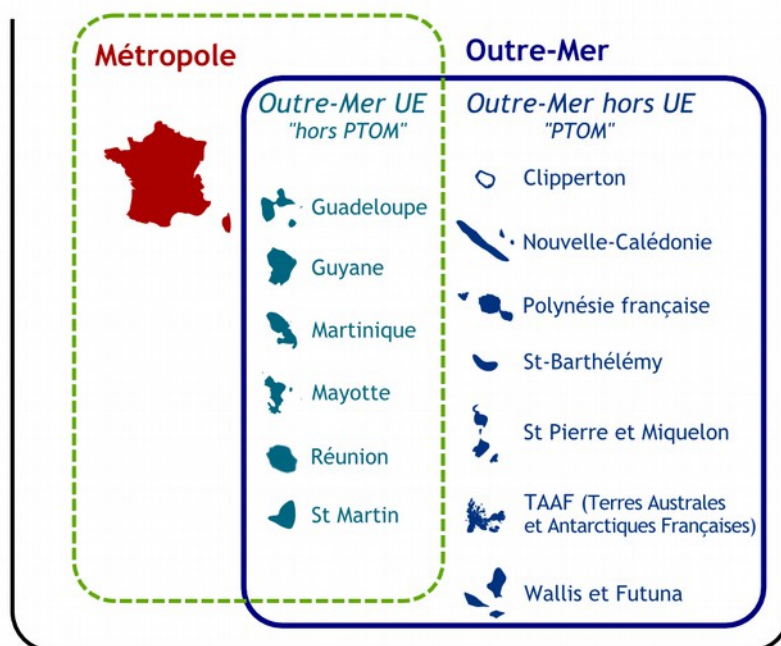
Le format SECTEN (secteurs économiques et énergie) est adapté à l'inventaire national et inclut des analyses sectorielles. Son périmètre géographique est restreint à la France métropolitaine (y compris Corse) avec quelques fichiers au périmètre de Kyoto.

Le format Kyoto a pour périmètre géographique la métropole et tous ses territoires d'outre mer inclus dans l'UE, c'est-à-dire les régions dites ultrapériphériques : Guadeloupe, Guyane, Martinique, Mayotte, Réunion, et Saint-Martin.

Le format CCNUCC (convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques) a pour périmètre géographique la métropole et tous ses territoires outre mer : c'est le périmètre Kyoto avec en plus la Nouvelle-Calédonie, la Polynésie Française, Saint-Pierre et Miquelon, les Terres Australes et Antarctiques Françaises, Wallis et Futuna, et Saint-Barthélemy.

Le schéma ci-après explicite les différents périmètres :

France



Format SECTEN: périmètre métropole.

"France UE" : périmètre pris en compte pour l'inventaire au titre du Protocole de Kyoto

Source : CITEPA, http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten#Perimetre_geo

2.2. La prise en compte de l'UTCf réduit en général les valeurs d'émissions

Il faut aussi distinguer, lorsque des valeurs d'émissions sont disponibles, si elles incluent l'utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCf, en anglais LULUCF ; on dit aussi UTCATF : utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la forêt) ou pas. En 2014, au format Kyoto, les émissions de GES étaient de 458,9 MtCO₂éq hors UTCf et 408,3 en incluant la contribution (négative) de l'UTCf.

Cette catégorie UTCf est subdivisée en huit sous catégories dans le format CCNUCC : forêts, cultures, prairies, zones humides, zones urbaines, autres terres, produits bois et autres. Cependant il existe des variations dans la définition d'une zone forestière, la distinction entre prairies et zones humides, etc.

2.3. Les facteurs d'émission sont incertains et actualisés

Avant 2015, les valeurs des facteurs d'émissions des gaz à effet de serre CO₂ (dioxyde de carbone), CH₄ (méthane), N₂O (oxyde nitreux, ou protoxyde d'azote, ou gaz hilarant), SF₆ (hexafluorure de soufre), NF₃ (trifluorure d'azote), HFC (hydrofluorocarbones) et PFC (perfluorocarbones) étaient données par le second rapport du GIEC de 1995. Les 3^e et 4^e rapport du GIEC de respectivement 2001 et 2007 ont révisé ces valeurs.

Gaz	Potentiel de réchauffement global (PRG, en anglais GWP), selon IPCC AR2 de 1995 [avant 2015]	Potentiel de réchauffement global (PRG, en anglais GWP), selon IPCC AR4 ¹²⁶ [après 2015]
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1	1
méthane (CH ₄)	21	25
Oxyde nitreux (N ₂ O)	310	298
Hexafluorure de soufre (SF ₆)	23 900	22 800
Trifluorure d'azote (NF ₃)	—	17 200
Hydrofluorocarbones HFC	Très variable selon le HFC considéré : de 140 à 11 700	Très variable selon le HFC considéré : de 77 à 14 800
Perfluorocarbones PFC	Variable selon le PFC considéré : de 6 500 à 9 200	Variable selon le PFC considéré : de 7 390 à 12 200

Tableau 1 : Potentiels de réchauffement global des différents gaz à effet de serre - Source : <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6/assessment> et http://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_l/ipcc_sar_wg_l_full_report.pdf

Le GIEC considère que la valeur donnée pour le CO₂ est juste à ±15 % près ; les autres valeurs de PRG des GES ont 95 % de chances d'être justes dans un intervalle de ±35 % autour de leur valeur centrale.

De plus les valeurs considérées sont des valeurs à 100 ans. D'autres horizons de temps donnent des valeurs très différentes. Si le CO₂ a toujours la valeur 1 par convention quel que soit l'horizon temporel, le CH₄ par exemple a un PRG à 100 ans (resp. 20 ans ; 500 ans) de 25 (resp. 72 ; 7,6).

D'un inventaire à l'autre, d'autres modifications méthodologiques ou liées à une actualisation/révision des données de base sont introduites, qui peuvent amener à revoir les valeurs des années précédentes. Le rapport CCNUCC français de 2016 détaille ainsi 107 modifications qui amènent à revoir les chiffres des années précédentes (cf. annexe 6).

¹²⁶ Les coefficients sont susceptibles d'évolutions, cf. AR5 <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>

2.4. Autres éléments de variabilité

Enfin il convient de vérifier si les émissions considérées incluent bien le secteur couvert par le système européen d'échanges de quotas ETS ou pas.

Le système ETS impose depuis 2005 un plafond d'émissions aux « gros émetteurs », soit 11 400 installations des secteurs de l'industrie et de l'énergie. En 2013 le périmètre s'est étendu à des nouveaux secteurs et gaz à effet de serre pour couvrir 16 400 installations, plus l'ensemble des vols intracommunautaires. Ces émissions représentent en 2014 1 787 MtCO₂éq.¹²⁷

Le reste des émissions est réparti entre États membres selon le système ESD (« *Effort sharing decision* ») et représentent en 2014 2484 MtCO₂éq.

L'extension de l'ETS aux vols intracommunautaires reflète un problème encore non résolu, à savoir celui de la prise en compte ou pas des routes aériennes. Les émissions aériennes représentent une part encore faible mais croissante et non négligeable des émissions. Par exemple, dans l'Union européenne en 2014, les émissions dites à « périmètre international » (excluant les émissions des vols intérieurs) représentent 4-286 MtCO₂éq, et celles dites à « périmètre domestique » (incluant les vols intérieurs) représentent 4 421MtCO₂éq soit 3 % de plus¹²⁸.

Enfin il convient de vérifier si les données sont corrigées des variations climatiques ou pas. Ce facteur est de plus en plus important, en raison de la variabilité croissante du climat et des années exceptionnelles qui se succèdent.

2.5. Exemple de dispersion des données pour les émissions récentes et de référence

À titre d'illustration voici les différentes valeurs pour la France sur les différents formats, pour des années récentes et de référence indiquées dans l'inventaire 2016 pour les années 2014 et antérieures.

¹²⁷ Chiffres clés du climat France et monde, édition 2016, SOeS; <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6/assessment>

¹²⁸ http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_air_gge&lang=en

Émissions (Mt CO ₂ éq)	1990	2005	2012	2013	2014	2015 (estimé)
SECTEN	542	543	476	474	446	456
SECTEN yc UTCATF	508	491	419	416	392	402
Kyoto	548	555	488	486	459	469
Kyoto yc UTCATF	518	507	436	433	408	418
CCNUCC	551	559	494	492	465	
CCNUCC yc UTCATF	520	512	441	439	415	

Tableau 2 : Différentes valeurs d'émissions pour la France selon les formats et périmètres – source, note DGE 16-154 (pour l'estimation Kyoto 2015); CITEPA 2016, http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/CCNUCC_france_2016_indB.pdf pour CCNUCC et Kyoto, et http://citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/SECTEN/SECTEN-Fichiers_avril2016.zip pour SECTEN.

Les variations liées aux définitions de format et de périmètre sont significatives et peuvent dépasser 10 % voire 15 %.

À ces différences s'ajoutent les incertitudes, toujours importantes. Selon le CITEPA¹²⁹ par exemple, « l'estimation de l'incertitude sur les émissions totales exprimées en CO₂éq hors UTCATF pour l'année 2014 est de +/- 10,6% » ; et celle sur le secteur UTCATF est plus grande encore.

Il convient donc d'être attentif au sens et aux limites de validité des valeurs et séries statistiques, même si leurs variations et incertitudes n'empêchent pas nécessairement de décider d'orientations et de mesures.

¹²⁹ CDL (c'est dans l'air) n°203, juillet-août 2016

3. Commentaires sur les 33 recommandations de 2013

La présente annexe reprend la liste des recommandations de 2013 (par ordre d'apparition dans le texte du rapport) et examine brièvement leur pertinence aujourd'hui à la lumière des évolutions constatées.

1. Organiser la fonction d' « observatoire du facteur 4 » avec les acteurs en place, en faisant converger système de mesure, évaluation des politiques publiques, évaluation des perspectives technologiques et économiques, vulgarisation et pédagogie.

Il existe de nombreux observatoires, généraux ou sectoriels, certains centralisant les données, ainsi que de nombreuses enceintes de concertation, d'échange et de participation. Par contre, dans la plupart des secteurs, la qualité et la fiabilité des données doivent être améliorées, ainsi que leur lisibilité, obscurcie par de multiples formats, périmètres, dates de référence. Il est probable que l'observatoire doit disposer de tableaux de bords complets et complexes pour le pilotage de la politique publique, et aussi de tableaux résumés d'indicateurs simplifiés en vue d'une communication lisible. La mise en place de la SNBC et le suivi de sa mise en œuvre fournissent un cadre supplémentaire. L'évaluation de la SNBC est en cours de préparation avec un rythme prévisionnel bisannuel. Les perspectives technologiques et économiques sont elles aussi suivies. L'effort de pédagogie et de communication actuel est salutaire et doit être amplifié. En résumé, la recommandation reste pertinente même si de nombreuses actions sont en cours.

2. Piloter le prix à la consommation finale des énergies fossiles carbonées (en l'ajustant au bon niveau grâce à une taxe notamment) en référence à un *trend* d'augmentation des prix à moyen terme cohérent avec les diminutions d'émissions souhaitées.

La loi de finances rectificative 2015 prévoit que la taxe carbone, appliquée depuis 2014 aux consommations d'énergie fossile (produits pétroliers, gaz et charbon), augmentera de 8,50 € par tonne de CO₂ en 2017, passant à 30,50 € par tonne, puis 39 € en 2018 et 47,5 € en 2019, en cohérence avec le rapport Quinet qui préconisait un prix de 56€ en 2020 et de 100€ en 2030. Par contre il ne s'agit que d'une composante, qui ne pilote donc pas le prix à la consommation finale. De fait, un tel pilotage est difficile tout particulièrement dans une économie concurrentielle, et aussi pour des raisons de fuite de carbone, d'acceptabilité, etc.

3. Éviter une baisse des prix à la consommation dans le cas où l'arrivée des hydrocarbures non conventionnels réduirait temporairement la pression sur les coûts d'approvisionnement, par exemple grâce à une modulation dans le temps de la taxation.

Ces recommandations (2 et 3), et notamment la seconde (recommandation 3) n'ont pas été suivies dans le contexte actuel (depuis mi-2014 à mi-2016) de bas prix des hydrocarbures. En tout état de cause, une telle TIPP flottante inversée est difficile à mettre en œuvre, pour des raisons politiques, sociales, etc. Elle supposerait une possibilité donnée au gouvernement d'agir rapidement compte-tenu de la volatilité des

prix, et probablement une utilisation consensuelle des sommes ainsi collectées . En résumé, la programmation à moyen terme de la taxe est une bonne chose, mais il manque encore un pilotage de la fiscalité carbone réactif aux fluctuations du marché -pilotage probablement très délicat à mettre en œuvre.

4. La trajectoire permettant d'espérer l'atteinte des objectifs en 2050 passe vraisemblablement par une diminution des émissions en 2020 de 25 % et non de 20 %, ce qui suppose en chiffres ronds un effort de réduction de 3 % par an (au lieu de 2 %). La France doit défendre cette position dans les négociations européennes.

On peut considérer que l'objectif du paquet « Énergie climat 2030 » (-40 % d'émissions de GES en 2030 par rapport à 1990) est cohérent avec cette préconisation de 2013. L'objectif pour 2020 n'est toujours que de -20 %, mais les projections font état d'une diminution de 24 % des émissions de GES à cette échéance. La situation présente requiert, pour l'atteinte du facteur 4, un rythme de réduction de plus de 3 %/an en France. Le problème du report à plus tard (après 2020) des efforts reste entier, dans un contexte tendanciel préoccupant, puisque les objectifs de 2030, dans la trajectoire actuelle, ne seront pas atteints en UE sans mesures supplémentaires.

5. Accélérer dans le cadre d'Eurostat les travaux préalables indispensables pour pouvoir dès que possible mettre à l'agenda une valorisation européenne du GES importé.

En théorie cette recommandation reste attrayante. Mais la France semble pour l'heure isolée en Europe sur ce sujet, notamment en raison des risques liés à une guerre de tarifs douaniers.

6. Pour mieux répartir l'effort de réduction des émissions dans la durée en augmentant l'effort aujourd'hui et ne pas laisser à nos successeurs un effort irréalisable, envisager des « valeurs du carbone » ou des prix des énergies fossiles croissant rapidement dans les prochaines années et éventuellement moins vite par la suite.

Cette recommandation reste valable même si elle n'est pas reprise dans le présent rapport. L'instauration d'un prix du carbone (ou de plusieurs prix du carbone) fait de plus en plus consensus afin d'enfin valoriser les externalités négatives des émissions de GES, avec un appui des entreprises, et l'émergence de marchés carbone régionaux. Des « valeurs du carbone » ont été instaurées en France (Cf. recommandation 2).

7. Développer la recherche sur les composantes de la demande de transport de marchandises à longue distance et sur ses déterminants.

Ces données sont importantes, et ont motivé la mise en place d'un observatoire suite à la conférence logistique de 2014, avec par exemple la reconduction de l'enquête chargeurs ECHO sur le lien entre transport et industrie/distribution. Il y a bien un Intérêt à conduire une réflexion sur la modélisation du transport de fret pour développer les outils d'évaluation des politiques publiques dans ce domaine. La recommandation

reste donc valable et a eu un début d'application grâce à la conférence logistique. Une revue bibliographique reste à faire, et de nombreux problèmes à étudier.

8. Favoriser les nouveaux services de mobilité décarbonée, notamment dans l'habitat diffus.

La recommandation reste utile. Des initiatives récentes sont à noter, comme la promotion des territoires à énergie positive pour la croissance verte, les « territoires hydrogène », le développement de bornes de recharge pour réaliser à terme un maillage territorial, etc. La mobilité dans l'habitat diffus repose essentiellement sur la voiture. Des initiatives sont possibles au niveau de la motorisation (on observe par exemple un développement du véhicule électrique), de l'utilisation des véhicules (covoiturage, transport à la demande), voire du recours à d'autres modes de transport. Une telle recommandation permet aussi de mieux sensibiliser l'espace rural.

9. Dans l'attente d'un éventuel accord international prévoyant la mise en place de nouveaux mécanismes contraignants pour réduire les émissions de GES, le système européen de quota d'émission de GES (SEQUE) est le seul système communautaire d'incitation à la réduction des émissions utilisant un signal prix. La France doit apporter son plein soutien au renforcement adopté en 2009, à la vente aux enchères des quotas, à une répartition adéquate des mises aux enchères pour assurer un soutien du prix. Le SEQUE pourrait efficacement élargir la couverture des émissions de CO₂ par extension aux consommations diffuses de combustibles et carburants fossiles.

Depuis 2013 le périmètre du SEQUE s'est étendu à l'inclusion de nouveaux secteurs et gaz à effet de serre, quelque 16 400 installations et l'ensemble des vols intra-communautaires sont désormais contraints par cette politique. Une réforme du système a été proposée avec pour objectif d'aboutir à des prix des quotas incitatifs. Mais dans le domaine des transports terrestres, un système de taxation¹³⁰, complété par des règlements sur les émissions, est sans doute préférable à l'instauration de quotas. La dernière partie de la recommandation ne semble plus d'actualité.

10. Soutenir la recherche sur la connaissance des flux de carbone et d'azote dans les sols agricoles et forestiers.

Le sol (notamment sa capacité de séquestration ou perte de carbone et la dépendance de cette capacité aux conditions externes) reste mal connu et constitue un enjeu important. Des études diverses ont été menées : projet « no gas 2 » du CETIOM, expertises scientifiques collectives (ESCo) « stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? », « artificialisation des sols » et MAFOR (valorisation agricoles des effluents) GIS changement d'affectation des sols, etc.; l'initiative « 4 pour 1000 »¹³¹ (qui fait partie de l'agenda du plan d'action Lima-Paris) part du constat qu'« augmenter chaque année le stock de carbone des sols de 4 pour 1000 dans les 40 premiers centimètres du sol permettrait, en théorie, de stopper l'augmentation actuelle de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère, à condition de stopper la déforestation. », et dans son cadre est en cours la synthèse des sources de connaissance sur les émissions diffuses liées à l'agriculture et la forêt. Les variabilités des propriétés du sol sont cependant très importantes, même au niveau infra-parcellaire. L'alliance globale sur la

¹³⁰ De type taxation sur les produits énergétiques : directive 2003/96/CE, TICPE, ...

¹³¹ <http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Web/2015-12-01/4-pour-1000-Inra.pdf>

recherche (GRA) met en cohérence les programmes de recherche dans le monde. La France s'attache notamment à la problématique du stockage du carbone. La démarche d'agro-écologie, en cours de déploiement en France, est globale (accroissement des interactions biologiques, bouclage des cycles...), ne s'intéresse pas uniquement aux émissions de GES mais aussi à la consommation d'eau, à la diminution des pollutions, à la qualité et à l'érosion des sols, et elle prend aussi en compte les cycles (carbone, azote,...) qu'il faut boucler. La recommandation reste donc valable même si des efforts ont lieu.

11. Œuvrer pour obtenir le changement des normes internationales de prise en compte des puits de carbone dans les inventaires de GES.

La recommandation porte sur un sujet de préoccupation important, reste pertinente et constitue la position française. L'accord de Paris et ses dispositions pour l'amélioration des méthodes de MRV (*monitoring, reporting and verification*) constitue un environnement favorable. Un futur rapport du GIEC sera spécifiquement consacré aux sols. Les négociations au sein de l'UE sur le cadre énergie climat 2030 prennent en compte le secteur des terres et les modalités de cette prise en compte sont en cours de négociation. Cependant, sur ce sujet des puits de carbone la France est isolée au sein de l'Europe quand elle préconise un calcul des émissions des forêts plus en phase avec les réalités physiques, au lieu de se limiter aux écarts relevés par rapport à une « référence » théorique qui peut masquer certaines insuffisances.

12. En attendant le changement des normes, orienter l'action publique vers la recherche de la meilleure efficacité réelle, et non la maximisation des résultats selon les normes de calcul internationales lorsque celles-ci sont inadéquates.

Ici encore cette question est au cœur des préoccupations actuelles et la prise en compte dans les inventaires évolue.

En agriculture, les cultures et prairies durables ont désormais, dans les inventaires, une composante carbone liée à la gestion, avec un effet significatif pour les cultures. Un compartiment « produits » est désormais introduit dans les inventaires. Et la SNBC incite à une prise en compte des mesures sans se limiter à celles qui apparaissent dans les inventaires agricoles.

Les politiques publiques relatives à la forêt visent bien à davantage exploiter la forêt française avec l'idée que le bilan global, notamment celui concernant les émissions de GES sera positif à long terme. Il convient de tenir compte également des spécificités de la forêt guyanaise, unique grande forêt équatoriale dans l'Union européenne. Cette recommandation reste, dans son esprit, pertinente. Parallèlement, il reste à améliorer le rapportage international en matière d'impact des forêts.

13. Inscrire des objectifs de réduction des émissions de GES dans la négociation 2013 de la PAC et prévoir le soutien aux mesures techniques comme la méthanisation et l'agro-foresterie via l'inclusion de l'agriculture dans les marchés de carbone, ou via une ré-orientation des aides de la PAC en cours de période 2013/2020.

La recommandation est apparemment obsolète puisque la négociation a eu lieu ; la PAC encourage le « verdissement » et le « maintien » des prairies permanentes, avec des dérogations toutefois. De plus il existe désormais en France un programme d'agro-

écologie et un plan Agroforesterie lancé en 2015. Le sujet de la méthanisation est aussi objet de politiques publiques (plan Energie Méthanisation Autonomie Azote par exemple) même si certaines difficultés subsistent. La recommandation reste pertinente pour la négociation à partir de 2018 de la prochaine PAC, afin d'améliorer encore la prise en compte des émissions de GES (par exemple par l'interdiction des sols nus).

14. L'essentiel des méthodes propres à réduire les émissions de GES dans l'agriculture UTCF étant d'ores et déjà connu, développer les études et expérimentations technico-économiques explorant les conditions économiques et sociales de leur déploiement, et en déduire les aides nécessaires via la PAC et/ou l'inclusion dans les marchés de carbone.

La démarche d'agro-écologie, a été lancée en 2012 et promeut notamment les GIEE (groupements d'intérêt économique et environnemental). À ce jour, on compte 370 GIEE rassemblant 5 000 agriculteurs (sur un total de 480 000 chefs d'exploitation, ou 300 000 répondants à la PAC). Il y en aura 400 en fin d'année. Le MAAF vise l'objectif de 50 % d'agriculteurs engagés en 2025. Par ailleurs des réflexions et enquêtes ont lieu, par exemple au sein du club « carbone forêt bois » ou « club climat agriculture », pour évaluer la motivation des acteurs, le consentement à agir et les impacts financiers associés. L'effort doit être poursuivi. Par exemple des améliorations sont possibles (en matière de méthodes de réduction d'émissions de GES) sur le carbone des sols, les mécanismes d'émission du N₂O ou la réduction du méthane entérique du cheptel. Et l'existence de mesures « à coût négatif » non mises en œuvre montre l'utilité d'élargir le champ d'investigation aux conditions économiques et sociales. La recommandation reste valable.

15. Recenser les facteurs (y compris les normes réglementaires) qui favorisent actuellement l'artificialisation des sols.

L'artificialisation des sols concerne environ 600 km²/an et un objectif de la SNBC est de la réduire à 100 km²/an en 2030. Les causes de l'artificialisation semblent bien connues : hors habitat, les implantations commerciales et le développement de l'espace public ; et pour l'habitat, développement augmentation de la population, augmentation du revenu disponible et de la surface habitable, baisse du coût des transports, appétence pour les zones « à la campagne », accroissement rapide du nombre de ménages, notamment sous l'effet des phénomènes de décohabitation (+ 38 % de 1980 à 2013, contre + 18 % pour le nombre d'habitants), et accroissement de la part de l'habitat individuel (57 % en 2013). Le phénomène dominant est l'artificialisation au voisinage des grands centres et le long des grands axes de communication. Le sujet des normes réglementaires et de l'impact de la fiscalité est sans doute moins connu. En tout état de cause, les comportements sont déterminants et leur inflexion malaisée. La recommandation est partiellement obsolète, ce qui ne dispense pas de poursuivre l'observation. A contrario, l'artificialisation des sols pourraient être partiellement ralentie soit par un encadrement des SCOT et des PLU dans le code de l'urbanisme, soit par une action concertée des MRAe lors de l'évaluation environnementale des PLU et des SCOT.

16. Développer des recherches sur les causes (tenant notamment à la dérégulation du marché foncier et au droit de l'urbanisme) qui favorisent le développement de l'habitat dispersé et les déplacements motorisés.

Il existe une littérature académique abondante sur les interactions transport-urbanisme, des travaux par la SGP (Société du Grand Paris) de comparaison de modèles LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) au niveau national. Mais les recherches sont coûteuses et requièrent de l'expertise rare, d'où l'intérêt de mutualiser les efforts, avec des souhaits d'animation au niveau national d'une communauté des modélisateurs LUTI (État, régions, agglomérations, SGP...) pour mettre en commun les expériences et favoriser la cohérence d'ensemble. La recommandation reste valable.

17. Développer études et recherches sur les conséquences en termes d'émission de GES des différentes formes d'artificialisation des sols et notamment de l'éclatement urbain.

Des recherches nombreuses existent, qu'il s'agisse d'études d'élasticité précises sur l'empreinte carbone du développement des banlieues (vivre en couronne consomme six pleins d'essence de plus par an par foyer ; doubler la densité résidentielle résulte en l'économie de deux pleins par an par foyer...) ou de considérations plus générales sur la ville durable¹³². Voir recommandation 16.

18. Envisager le bois stocké (par exemple dans la construction) comme un moyen compétitif de séquestration du carbone et mettre en œuvre un programme cohérent de mobilisation et de valorisation de la ressource forestière.

La loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (adoptée le 13 octobre 2014) a reconnu d'intérêt général la séquestration du carbone dans le bois et les produits en bois. Sur la base de la loi, le programme national de la forêt et du bois (PNFB), adopté en mars 2014, décline à ce sujet plusieurs axes de travail. L'essor récent de la construction en bois témoigne d'une prise de conscience en la matière. Et la SNBC¹³³, suivant les recommandations d'un rapport CGEDD-CGEiet-CGAAER de septembre 2012¹³⁴ et d'un rapport CGAAER d'octobre 2014¹³⁵, identifie comme levier important de lutte contre le changement climatique le recours au matériau bois en substitution aux matériaux énergivores (acier, ciment, plastique)¹³⁶. Un autre levier important identifié est la valorisation énergétique de la biomasse forestière en substitution aux combustibles fossiles. Le stockage de carbone dans les produits bois et la séquestration du carbone dans l'écosystème forestier complètent les leviers d'action de la forêt bois.

¹³² <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Etalement-urbain-et.html>

¹³³ Source : SNBC, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf p. 218

¹³⁴ « Les usages non alimentaires de la biomasse », septembre 2012, http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Cgpc-CGEOUV00125090&n=1&q=%28%2B%28sujet_word%3Abiomasse+sujet%3A%7Cbiomasse%7C%29%29&fulltext=&depot=&

¹³⁵ « Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique », <http://agriculture.gouv.fr/telecharger/57006?token=f89b653b919a60bfed3633e8e288c3bf>

¹³⁶ Selon le rapport précité « la filière bois pourrait représenter un gain potentiel d'émissions d'environ 25 à 30 MtCO₂/an en substitution -en incluant les bioproduits d'origine agricole (environ 4 MtCO₂/an)- à l'horizon 2030 et de 3 à 5 MtCO₂/an en stockage »

Ces analyses sont confirmées par un avis de l'ADEME de juin 2015, intitulé « forêt et atténuation du changement climatique »¹³⁷. En substance, l'avis fait le constat que la filière bois énergie est appelée à se développer dans le contexte de la transition énergétique, mais que l'intensification des prélèvements en bois peut avoir pour conséquence de diminuer le rythme de séquestration du carbone dans les écosystèmes même si les stocks croissent.

Il est donc nécessaire de compenser ce manque de séquestration en procédant à la séquestration additionnelle dans les produits bois pendant une durée suffisante, au-delà de laquelle le bilan est positif. L'avis de l'ADEME constate l'importance de l'effet de substitution consécutif à l'utilisation du bois matériaux (en moyenne 1,1 tCO₂eq évité par m³ de bois contenu dans les produits finis) double de l'effet de substitution énergétique (1 m³ de bois rond utilisé en production de chaleur évite environ 0,5 tCO₂). Il conclut à l'utilité d'une approche en analyse du cycle de vie, et spécifiquement d'une optimisation du recours au bois grâce à une « cascade » d'utilisations successives : d'abord utilisation en bois matériau, puis recyclage, et enfin valorisation énergétique lorsque le recyclage en matériau n'est plus possible.

Enfin, l'étude « Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 »¹³⁸ réalisée par l'INRA pour le compte du MAAF en 2016 traite des leviers forestiers permettant d'atténuer les émissions nettes de CO₂ de la France. Le périmètre géographique est la France métropolitaine. L'étude présente le flux de matières et de dioxyde de carbone de la filière bois.

On peut considérer que cette recommandation a été suivie de travaux qui répondent à ses préoccupations et qu'il reste à poursuivre la mise en œuvre d'une politique de stockage du CO₂ dans le bois, notamment dans la construction.

19. Développer des modélisations sylvicoles et économiques permettant de répondre à la nécessité d'une gestion plus active des forêts, en réponse aux besoins d'adaptation et d'atténuation nés des effets du changement climatique.

Voir recommandation 18 précédente. Le PNFB doit dynamiser la gestion forestière au travers de six axes dont un relatif au soutien de la R&D sur l'amont forestier et la sylviculture. La question de la faisabilité d'une gestion plus active des forêts reste par contre posée, en raison de particularités liées aux essences (feuillus surtout alors que les capacités de sciage portent plutôt sur les résineux), à l'éclatement des propriétaires (même si 10 % des propriétaires possèdent 75 % du bois, ce qui justifie le ciblage par le PNFB des propriétés de plus de quatre hectares), aux questions d'accès (le PNFB recommande d'ailleurs d'améliorer l'accessibilité des massifs), à l'importance de la forêt non gérée en France, etc. La recommandation reste donc actuelle même si des travaux sont en cours.

20. Dans le domaine du bâtiment, redonner la priorité à la lutte contre les émissions de GES ; reconsidérer à cet égard le principe de l'évaluation en énergie primaire.

¹³⁷ http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis_ademe_foret-attenuation-cggt-clim_vdef.pdf

¹³⁸ <http://agriculture.gouv.fr/leviers-forestiers-en-termes-dattenuation-pour-lutter-contre-le-changement-climatique-aux-horizons>

La réglementation à finalité également environnementale prévue pour 2018, pour prendre la suite de la RT 2012, prend en compte les émissions carbone. L'évaluation en énergie primaire n'est par contre pour l'instant pas remise en cause, d'autant plus qu'elle découle d'une directive européenne. La recommandation a donc partiellement été suivie de mesures en son sens. Il demeure pertinent de renforcer la contrainte carbone, possiblement de manière progressive.

21. Dans le domaine du bâtiment, poser clairement le plus tôt possible les problématiques d'écart entre les économies théoriques et les économies constatées de façon à engager la recherche de solutions. Développer la recherche et les études permettant de comprendre les causes de ces écarts, pour s'efforcer d'y remédier.

Cette recommandation, au vu de l'importance du secteur du bâtiment et des effets rebonds, ainsi que du dramatique écart entre rythme de rénovation souhaité et observé, reste pertinente malgré l'importance des travaux qui lui sont consacrés.

Ce point crucial est à bien prendre en compte, non seulement en termes de résultats des politiques publiques et objectifs nationaux, mais aussi lorsque la garantie de résultat participe du montage financier, soit en valorisation « verte » attendue du patrimoine, soit en conséquences concrètes sur la baisse de facture énergétique, permettant de rembourser les investissements. La crédibilité de la démarche de rénovation et sa popularisation en dépendent aussi.

22. Confier aux grands opérateurs (notamment fournisseurs d'énergie) la mission de promouvoir des formules « clé en main » auprès de leurs clients, comportant étude technique et financière des travaux, offre de financement et remboursement intégré aux factures d'énergie.

Cette recommandation repose sur une base saine, à savoir la nécessité d'un accompagnement « clé » en main afin de simplifier la décision du passage à l'acte et de garantir une vision d'ensemble, nécessaire en rénovation thermique. Quelques expériences sont en cours reprenant tout ou partie de cette recommandation. Le recours aux grands opérateurs, notamment fournisseurs d'énergie, n'est par contre pas nécessairement exclusif. Ces derniers ont été mis à contribution pour financer, via les certificats d'économie d'énergie, la lutte contre la précarité énergétique.

23. Donner aux opérateurs précités des obligations annuelles de résultat relatifs à cette procédure « clé en main » sur le mode des certificats d'économie d'énergie.

Cette recommandation repose aussi sur une base saine, à savoir une obligation de résultat, basée sur des mesures fiables. Voir cependant recommandation 22.

24. Dimensionner ces obligations de résultat pour l'atteinte des objectifs fixés au niveau national en matière d'économies de GES (et non d'énergie).

Voir recommandation 23. Ces trois recommandations 22, 23 et 24 restent acceptables ; les récentes initiatives d'EDF et ENGIE en matière d'autoconsommation

vont en partie en ce sens¹³⁹, et les opérateurs fournisseurs d'énergie sont en effet en contact direct avec les clients / propriétaires. Ils peuvent fort bien connaître aussi la problématique des bâtiments ; il convient cependant de ne pas se limiter à leurs seules compétences.

25. Améliorer la connaissance du « gisement » d'économies de CO2 dans le bâtiment et de la rentabilité globale de chaque catégorie de travaux selon les hypothèses d'évolution des coûts de l'énergie et tenir à jour cette connaissance. Promouvoir la recherche dans ce sens.

La recommandation reste dans son esprit valable. Un travail additionnel d'acquisition et de fiabilisation de données, de segmentation, d'élaboration de matrices de coût de rénovation d'une classe énergétique à l'autre devrait être mené, tant en termes d'adaptation aux différents segments de bâtiments qu'en termes de qualification des résultats (taille d'échantillon, etc.). De plus, les évolutions récentes (décret en cours de consultation) en matière de rénovation du tertiaire, qui stipulent non seulement des économies d'énergie de 25 % en 2020 mais encore requièrent un scénario d'évolution vers -40 % en 2030, participent de cette approche d'ensemble de la rénovation.

26. Développer la recherche sur les élasticités de la consommation d'énergie à l'offre, à court et à long terme, par secteur, etc.

Les données en la matière existent mais sont parcellaires et l'offre est en pleine évolution, la recherche additionnelle reste donc utile.

27. Entreprendre une action pédagogique étendue, à la fois d'écoute et d'explication sur l'énergie éolienne terrestre.

Il y a eu beaucoup de communication sur l'éolien terrestre mais les oppositions perdurent, notamment lorsque l'implantation est proche de chez soi. La recommandation, au vu des ambitions nationales en matière de développement de l'éolien terrestre, reste pertinente. Le financement participatif de ces installations est un moyen d'impliquer les habitants dans leur réalisation.

28. Encourager dès maintenant « sans modération » la récupération de chaleur, l'hydraulique, l'utilisation de la biomasse non valorisable, l'énergie éolienne.

La recommandation, qui prend en compte tant l'énergie électrique que l'énergie thermique souvent oubliée, reste valable, notamment en raison du retard pris en matière de développement des énergies renouvelables en France vis-à-vis des objectifs, malgré une forte croissance et des conditions économiques (soutien, évolution des coûts et performance) parfois très favorables.

29. Faire des paris, notamment à l'occasion de la réflexion sur les normes de construction pour 2020, sur les développements de « l'énergie 2.0 » et en tout cas laisser ouvertes les possibilités de déploiement de ces systèmes.

¹³⁹ offre de la filiale spécialisée d'EDF, en autoproduction / autoconsommation solaire : <https://www.edfenr.com/> et en particulier, <https://www.edfenr.com/actualites/groupe-edf-officialise-virage-vers-lautoconsommation/>. Mais aussi offre d'ENGIE, « my power » : <http://www.engie-travaux.fr/production-d-electricite/travaux/autoconsommation-my-power-engie>

Des réflexions sont en cours à ce sujet¹⁴⁰, par exemple au sein du plan bâtiment durable dans la perspective des nouvelles réglementations, ou au sein de la DGEC sur l'autoproduction et l'autoconsommation, et plus généralement sur la question de la stabilité des réseaux. Le sujet dépasse d'ailleurs le secteur du bâtiment. La problématique du véhicule électrique et de l'exigence en termes de pics de puissance requis par la charge d'un parc conséquent (mais aussi des bénéfices du recours aux batteries de ce parc pour stabiliser le réseau), ou la disponibilité de points de charge chez soi et au bureau, en est un exemple. Les appels à projet « territoires à énergie positive pour la croissance verte », le déploiement des compteurs intelligents ou des réseaux intelligents peuvent constituer des expérimentations instructives. La recommandation reste d'actualité.

30. Développer les recherches sur les comportements réels vis-à-vis des paramètres environnementaux.

La différence entre les calculs conventionnels et les résultats réels s'expliquent largement par des comportements peu ou mal appréhendés, face qui plus est à des situations inédites. Les recherches sont actives, mais la recommandation reste d'actualité, qu'il s'agisse d'éducation, de sobriété, d'efficacité, d'effet rebond, de passage à l'acte de rénovation ou de décarbonation d'un processus.

31. Engager des programmes importants de sensibilisation, de formation et d'information sur le changement climatique et les moyens concrets de réduire les émissions de GES envers les « corps intermédiaires » de professionnels au contact du public.

La recommandation reste d'actualité, en liaison avec le métier de la rénovation énergétique et de la rénovation ou construction bas carbone. La sensibilisation de la profession du bâtiment et le développement des compétences et de la prise en compte des interfaces avec d'autres corps de métier reste utile.

32. Poser le plus tôt possible la question des limites et des obstacles qui risquent d'être rencontrés dans la rénovation thermique lourde du parc de bâtiments afin de s'engager sans attendre dans la recherche de solutions.

Les obstacles sont entre autres des obstacles de connaissance, de compétence, de motivation et pédagogie, de coût, de financement et trésorerie, de fiabilité. Des solutions partielles existent sans doute, par exemple dans le bâtiment social, susceptible de solutions plus systématiques, dans les bâtiments de l'État avec la nouvelle feuille de route y afférente, dans le parc général avec des solutions innovantes, éventuellement au niveau d'îlots d'habitations. Elles sont susceptibles de constituer des bonnes pratiques imitables. La recommandation reste pertinente.

33. Mettre à profit les moments de crise pour engager les transformations nécessaires, lorsqu'à la fois l'opinion en comprend la nécessité et que l'offre technologique est disponible.

¹⁴⁰ Pour mémoire, l'expression « énergie 2.0 » renvoie à un nouveau modèle du secteur de l'énergie, intégrant production, consommation et décision décentralisée, stockage de l'énergie, réseaux intelligents, et de manière générale convergence avec et recours important aux technologies de l'information et de la communication

Le vote de la LTECV, la mise en place de la SNBC, la signature de l'accord de Paris, la mise en place d'un corridor carbone participent de ces transformations nécessaires, qui ont eu lieu en concomitance avec une appréhension accrue du danger climatique mais aussi dans un contexte de baisse probablement fragile des prix des énergies fossiles et d'une offre technologique partielle. La recommandation, très générale, reste pertinente.

4. Commentaires sur les 12 points-clés de 2013

Les douze points clés du rapport de 2013 sont présentés en police italique, et les compléments du présent rapport sont en police normale.

1° L'influence sur le climat des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) met en cause la survie de nos civilisations si une réaction vigoureuse n'est pas entreprise très rapidement à l'échelle mondiale. La Conférence des parties de 2015 (COP 21) de la Convention Cadre des Nations unies sur le Changement Climatique, que la France a proposé d'organiser en 2015, sera décisive.

Ce point clé reste d'actualité.

La COP 21 a été un succès.

L'accord de Paris a été élaboré et adopté le 12 décembre 2015 par la COP 21, signé le 22 avril 2016 à New York par 177 États, et est entré en vigueur le 4 novembre 2016, ce qui est exceptionnellement rapide, et requiert désormais la mise en place d'instruments adéquats. Les engagements des États, pris en application de cet accord largement non contraignant, sont toutefois encore nettement insuffisants pour contenir le défi climatique. De plus la dynamique enclenchée peut être remise en question par l'alternance politique aux USA. Il importe cependant de poursuivre dans la voie tracée par la COP21, au niveau des États, mais aussi de tous les autres acteurs : collectivités, entreprises, associations, individus.

2° La France respecte formellement ses engagements au titre du protocole de Kyoto (l'engagement Kyoto de la France est +0 % en 2008-2012 par rapport à 1990 ; le réalisé est -10,6 %), mais il s'agit d'un résultat en trompe l'œil : l'« empreinte carbone » par habitant des Français a augmenté de 15 % en 20 ans si on prend en compte le solde des échanges extérieurs de GES.

Ce point clé reste d'actualité.

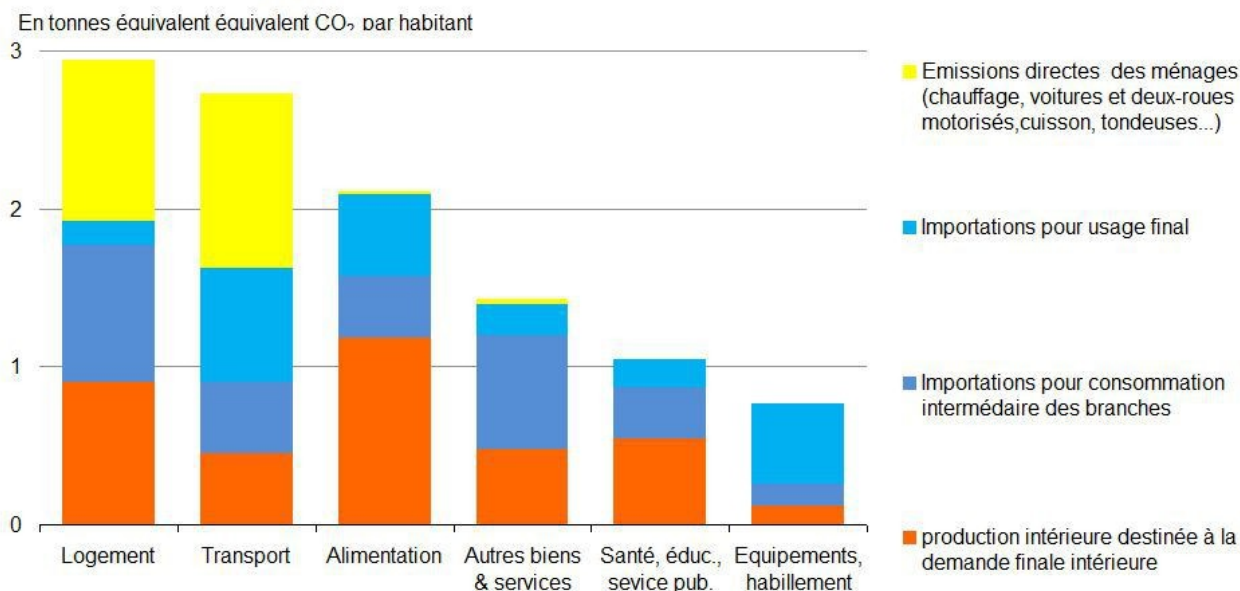
Spécifiquement: l'empreinte 2012 (666 Mt CO₂éq) est quasi identique à l'empreinte 1990 (659 Mt) après un pic de 690 Mt en 2010. Cependant les émissions du territoire métropolitain baissent: 541 Mt CO₂éq en 1990, 460 Mt CO₂éq en 2012). Selon les chiffres clés climat 2016¹⁴¹, les émissions directes des ménages sont en 2012 4% supérieures à celles de 1990, celles de l'industrie 36% inférieures, et les émissions associées aux importations ont progressé de 51%.

¹⁴¹ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2369/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2016.html>

Ce point clé met donc en exergue le fait que l'empreinte carbone française dépasse de moitié environ les émissions territoriales¹⁴² ; les secteurs peuvent aussi être examinés sous ce prisme.

←

Décomposition de l'empreinte carbone des Français par grands postes de consommation - année 2010



← Source, Ministère en charge de l'environnement, CGDD/SOeS, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/L_essentiel_sur/Energies_et_climat/Empreinte_carbone/2015/empreinte-carbone1c1.jpg

En 2015, et selon des chiffres provisoires, l'empreinte carbone pour le seul CO₂ (532 Mt CO₂) se situe sensiblement au même niveau que celle de 1995 (534 MtCO₂), le CO₂ associé aux importations (292 MtCO₂) étant supérieur aux émissions du territoire métropolitain hors émissions associées aux exportations (240 MtCO₂)¹⁴³.

3° Le «paquet climat-énergie» européen sur lequel la plupart des pays européens fondent leur programmation reporte de manière injustifiée les efforts à plus tard. Il prévoit un rythme de diminution relative des émissions faible entre 1990 et 2020 (20 % en 30 ans soit 0,7 % par an) puis un rythme croissant de diminution de décennie en décennie pour imposer à nos successeurs des années 2040 à 2050 un rythme insoutenable, sauf miracle technologique (plus de 6 % par an). Rien ne justifie une telle préférence pour le présent. La « feuille de route » européenne de mars 2012

¹⁴² http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_du_climat_2016.pdf , page 26 : les estimations d'empreinte en 2012 sont de 666 MtCO₂eq ou encore 10,5 tCO₂eq par habitant ; les émissions territoriales en 2012 sont de 460 MtCO₂eq ou encore 7,3tCO₂eq par habitant . L'empreinte est donc 45 % supérieure aux émissions territoriales ; l'empreinte par habitant est 44 % supérieure à l'émission par habitant.

¹⁴³ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Chiffres_cles_du_climat_France_et_Monde.pdf

évoque une réduction de 25 % en 2020 au lieu de 20 % : il est indispensable que la France s'y associe et l'applique pour elle-même.

Ce point clé, bien que daté et antérieur au paquet européen énergie climat 2030, reste dans son esprit actuel.

La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte¹⁴⁴ (LTECV), dans son article 1^{er}, stipule que «*La politique énergétique nationale a pour objectifs : « 1° De réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050. » et « 2° De réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à la référence 2012, en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030. »* La réduction de 40% des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2030 par rapport à 1990 est en ligne avec le paquet européen 2030.

La stratégie nationale bas carbone (SNBC), outil de mise en œuvre instauré par la LTECV, prévoit sur le second budget 2019-2023 une moyenne annuelle de 399 Mt CO₂eq contre 552 Mt CO₂eq en 1990 (hors utilisation des terres, leur changement et la forêt : UTCF) soit une réduction de 28%.

L'atteinte du facteur 4 toutes émissions confondues, en se basant par exemple sur l'inventaire au format Plan climat de Kyoto qui couvre l'intégralité des territoires français, requiert de passer d'émissions de 548 MtCO₂eq en 1990 (hors UTCF) à un quart de ces émissions en 2050, soit 137 MtCO₂eq. En tout état de cause, les taux annuels de décroissance requis¹⁴⁵ pour atteindre le facteur 4 sont actuellement d'environ 3,3 % jusqu'en 2050. Ces taux, en partant de diverses années de référence, ont augmenté ces dernières années, sauf en 2014 :

← Année	← 2050	← 1990	← 2000	← 2005	← 2010	← 2013	← 2014
← Émissions de GES (MtCO ₂ eq) hors UTCF ¹⁴⁶	← 137,0	← 548,1	← 554,3	← 554,8	← 514,5	← 486,5	← 458,9
← Taux annuel de décroissance requis pour l'atteinte du facteur 4 en 2050 en partant de l'année de la colonne	←	← 2,28%	← 2,76%	← 3,06%	← 3,25%	← 3,37%	← 3,30%

Ce troisième point clé reste un souci aussi sectoriel, même pour le bâtiment ; le secteur du bâtiment, très sollicité dans la stratégie nationale bas carbone (passage de 90 MtCO₂eq en 1990 et 99 MtCO₂eq en 2013 à 46 MtCO₂eq en 2028) échappe plus à cette préférence pour le présent que d'autres secteurs, mais son objectif pour 2050 est de l'ordre du facteur 6 ou 7 (soit moins de 15 MtCO₂eq) ce qui suppose, pour lui aussi, une accélération de l'effort à moyen terme.

4° La plupart des exercices de prospective fondés sur des hypothèses « raisonnablement optimistes » aboutissent à un facteur de réduction des émissions de GES de 2 à 2,5 plutôt que 4 entre 1990 et 2050. Pour atteindre le « facteur 4 » en

¹⁴⁴ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-3.pdf

¹⁴⁵ Si l'on fait l'hypothèse que le taux d'effort est constant chaque année. Les rendements étant souvent décroissants, cette hypothèse de calcul peut aussi être critiquée. Le but est de fournir un ordre de grandeur simple d'effort annuel.

¹⁴⁶ Format plan climat, périmètre Kyoto, hors UTCF

2050, tous les experts s'accordent sur la nécessité urgente de donner une valeur au carbone, c'est-à-dire de rendre plus coûteuses les activités émettrices de GES (et donc les consommations d'énergie fossile) qu'elles ne le sont aujourd'hui. La mission s'associe pleinement à cette analyse. Cette valorisation du CO₂ peut prendre des formes différentes : la taxation du GES émis ; la hausse de la taxation sur les causes d'émission, pour l'essentiel les hydrocarbures fossiles ; les systèmes de permis d'émission contingentés tels que le système européen des quotas d'émissions négociables (European emissions trading system ou EU ETS), instauré par la directive 2003/87/CE ; la réglementation : en effet les normes contraignantes, telles que la réglementation thermique 2012 (RT 2012) ou les limites d'émission des véhicules, ont pour effet économique de « valoriser » implicitement les émissions (à un niveau qui peut être élevé dans les faits).

Ce point clé reste d'actualité, tant pour ce qui concerne la difficulté à atteindre le « facteur 4 » qu'en ce qui concerne l'intérêt de mettre en place un prix du carbone, bien que le prix du carbone en tant que tel n'apparaisse pas dans les articles de l'accord de Paris.

Sur ces questions de valeur du carbone, le rapport « Mobiliser les financements pour le climat »¹⁴⁷ remis en juin 2015 par Pascal Canfin et Alain Grandjean propose l'établissement d'un « corridor carbone » avec un prix minimum de 15 à 20 \$/t CO₂ avant 2020 et un prix cible de 60 à 80 \$/tonne CO₂ en 2030/2035". La LTECV¹⁴⁸ reprend cette recommandation et stipule dans son article 1 alinéa VIII que « Le Gouvernement se fixe pour objectif, pour la composante carbone intégrée aux tarifs des taxes intérieures sur la consommation des produits énergétiques inscrites au tableau B du 1 de l'article 265 du code des douanes, d'atteindre une valeur de la tonne carbone de 56 € en 2020 et de 100 € en 2030 ». Un rapport du CGEDD est mené en 2016 sur cette problématique.

La révision du système d'échange de quotas d'émissions (EU ETS) est actuellement à l'ordre du jour. Le système EU ETS a été instauré par la directive 2003/87/CE et assure une réduction progressive du plafond d'émissions autorisées de 21 % entre 2005 et 2020 pour 11 000 installations électriques et industrielles européennes. Il a permis de réduire les émissions mais le prix du quota a dramatiquement baissé, notamment en raison du nombre de quotas alloués. En 2013, 900 millions de quotas ont été retirés sur les 16 milliards existants. En 2015 a été créée une réserve de stabilité du marché avec ajustement automatique de la quantité de quotas à partir de 2019.

Le 15 juillet 2015 la commission a adopté un projet de révision de la directive 2003/87/CE. Elle propose, pour l'essentiel d'introduire l'objectif agréé au Conseil européen de réduction des émissions de 43% d'ici à 2030 par rapport à 2005 pour les secteurs couverts par l'EU ETS. Cela induit une modification de la réduction annuelle du plafond d'émissions de 1,74%/an à 2,2%/an. D'autres propositions visent à allouer des quotas révisables annuellement sur la base du progrès technologique, à favoriser l'innovation (fonds d'innovation NER400 de 400 M€ faisant suite au NER300)- ; à mettre en place un fonds pour l'innovation en faveur des technologies bas carbone au bénéfice des pays de l'UE dont les revenus sont les plus bas, à poursuivre l'allocation

¹⁴⁷ <http://www.carbone4.com/sites/default/files/Rapport%20CANFIN%20GRANDJEAN%20FINAL%2018062015.pdf>

¹⁴⁸ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-3.pdf

gratuite de quotas à titre transitoire au secteur électrique et à mettre en place un fonds de modernisation des systèmes énergétiques; des dispositions visant à protéger l'industrie contre un risque de fuite de carbone.

Concernant la proposition française d'un corridor de prix, la Commission s'est montrée peu réceptive jusqu'à présent, préférant les approches basées sur les quantités plutôt que sur les prix.

Le parlement européen, de son côté, reprend la proposition du Royaume-Uni et de la France pour une approche graduée, mais pas les propositions de Mécanisme d'Inclusion Carbone (MIC¹⁴⁹), corridor de prix, harmonisation des coûts indirects. Au niveau de l'ambition, ce rapport propose de revoir le facteur de réduction linéaire tous les 5 ans à partir de 2023.

5° Le choix des dispositifs de valorisation des GES selon les secteurs doit prendre en compte le degré d'acceptabilité sociale des mesures correspondantes. Toutes choses égales par ailleurs, la mission émet une préférence pour une taxation modulée des hydrocarbures, lissant dans le temps les effets erratiques du marché mondial et programmant une hausse régulière des prix. Une part du produit de cette taxation doit être consacrée à des mesures en faveur des ménages les plus pauvres, indépendantes de leur situation énergétique, qui évitent globalement l'aggravation de leur situation. Enfin, on peut remarquer que toute taxation de l'énergie améliore le bilan des mesures destinées à l'économiser (des actions non rentables à un certain prix de l'énergie devenant rentable si le prix est plus élevé).

Ce point clé reste d'actualité en ce qui concerne l'importance de l'acceptabilité sociale des mesures. Par contre le principe d'une telle taxe flottante garantissant un prix de vente final élevé des hydrocarbures, renvoie à une « vérité » des prix au regard des dommages environnementaux causés. Une telle taxe semble cependant très difficile à mettre en œuvre. En revanche, toute taxe sera utilement accompagnée d'actions en faveur de la précarité énergétique.

6° Plusieurs rapports ont cherché à estimer une valeur tutélaire du GES émis (un « prix du CO₂ équivalent ») qui soit la même dans toute l'économie. Ce prix unique, qui a le mérite de la simplicité et qui serait justifié dans un monde idéal où un optimum de Pareto serait accessible, n'est pas la meilleure option dans notre monde « de second rang », où il vaut mieux accepter des « prix du CO₂ » différenciés selon les activités auxquelles ils s'appliquent voire selon les pays.

La question de la tarification du carbone reste clé. Des marchés sont mis en place un peu partout dans le monde, avec des prix différents, encore faibles sauf exception.

¹⁴⁹ Cf http://www.senat.fr/doslegman/4_pages_carbone.pdf : « Ce mécanisme consiste à intégrer dans le marché du carbone les produits fabriqués en dehors de l'Union européenne et relevant des secteurs exposés à des risques de délocalisation. On peut également parler d'un ajustement carbone aux frontières. Par exemple, les importateurs d'acier devraient acquérir des quotas dans une proportion correspondant au contenu carbone des produits importés. »

Panorama mondial des prix du carbone en juillet 2016

Prix 2016 donnés en €/t CO₂eq

- Système de quotas d'émission
- Système de quotas d'émission à venir
- Taxe carbone
- Taxe carbone à venir

* Variation de prix selon les secteurs/produits énergétiques

** ETS suspendu jusqu'en 2018

*** Le prix 2015 du Specified Gas Emitters Régulation (SNGER) est celui du tarif versé au Fond Climate Change and Emissions Management Fund de 10,9 €/t CO₂eq.

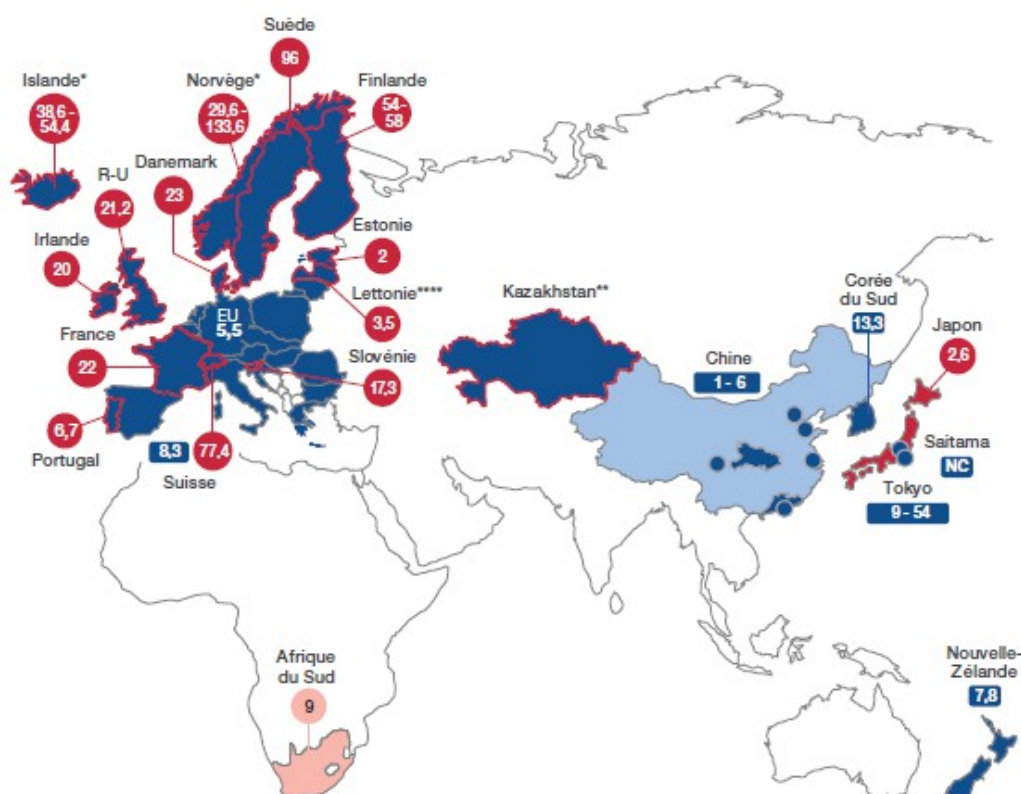
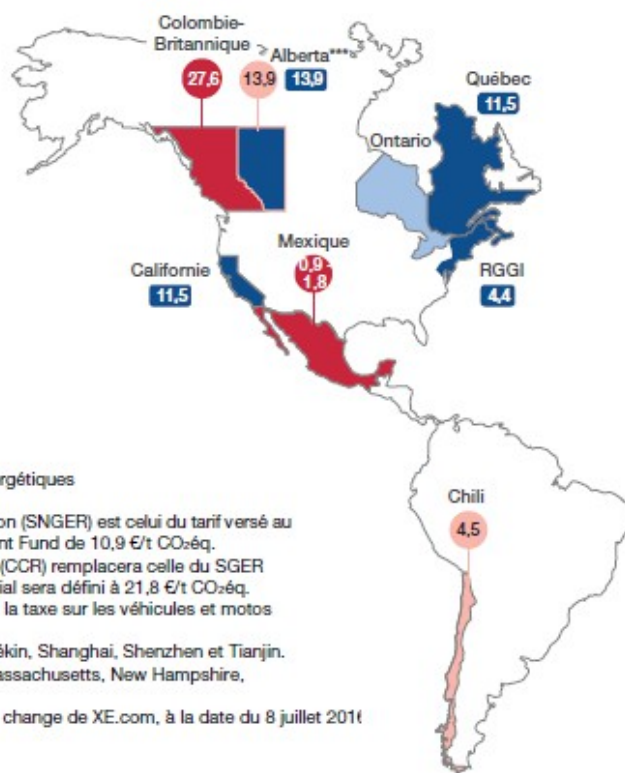
La législation Carbon competitiveness Regulation (CCR) remplacera celle du SGER en 2018, date à laquelle un prix carbone provincial sera défini à 21,8 €/t CO₂eq.

**** Lettonie a deux taxes sur les émissions de GES: la taxe sur les véhicules et motos et la taxe sur les ressources naturelles.

Pilotes chinois : Chongqing, Guangdong, Hubei, Pékin, Shanghai, Shenzhen et Tianjin.

RGGI : Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, New Hampshire, New York, Rhode Island, Vermont.

Note : les prix sont calculés en fonction des taux de change de XE.com, à la date du 8 juillet 2016



Panorama mondial des prix du carbone – source, Chiffres clés du climat France et monde, édition 2017, MEEM/SOeS, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2587/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2017.html>

7° Le bâtiment constitue le gisement le plus immédiatement exploitable d'économies de GES, même si les coûts d'abattement peuvent y être élevés. La mission constate la bonne acceptation des réglementations dans le neuf, mais des signes d'essoufflement de l'effort dans le parc existant. Elle estime qu'il y a nécessité d'envisager des obligations de faire dans ce secteur (formulées autant que possible en termes de résultat) en s'appuyant, le cas échéant, sur les grands opérateurs (sur le mode des certificats d'économie d'énergie).

De fait le secteur du bâtiment est celui qui est le plus chargé dans la SNBC, avec des objectifs de réduction des émissions annuelles de -23%, -20% et -25% sur les trois périodes 2015-2018, 2019-2023 et 2024-2028 par rapport à 2013 ou la période précédente.

Dans le neuf la RT 2012 s'applique. La RT 2012 est en cours de refonte afin d'arriver en 2018 à une nouvelle réglementation environnementale et non plus seulement thermique, qui prendra en compte le contenu carbone et le cycle de vie. À partir de 2020, les bâtiments devront être « à énergie positive ».

Dans le parc existant, les rénovations significatives (dites « performantes » ou « très performantes » : environ 280 000 en 2014 plus 105 000 dans le social) restent effectivement loin des objectifs de 500 000 logements rénovés par an en 2017 et leur impact est insuffisant. Toutefois, la RT 2007 est en voie de modification avec un durcissement des critères portant sur les « éléments ». Il n'en reste pas moins que depuis les années 2000 les consommations énergétiques finales du secteur bâtiment ne décroissent, pas, ce qui veut dire que les économies réalisées sur l'existant ne font que compenser l'accroissement dû au neuf.

L'article 5 de la LTECV prévoit que les bâtiments privés résidentiels dont la consommation est supérieure à 350 kWh/m²/an d'énergie primaire doivent avoir fait l'objet d'une rénovation avant 2025. Par ailleurs, le décret 2016-711 du 30 mai 2016 a défini les travaux dits « embarqués » à réaliser en cas de rénovation.

L'article 17 de la LTECV prévoit une obligation de rénovation prolongée par décennie de 2020 à 2050 pour les bâtiments tertiaires et dans lesquels s'exerce une activité de service public avec un niveau de performance renforcé pour chaque décennie avec un objectif de consommation d'énergie finale du parc réduite en 2050 d'au moins 60 % par rapport à 2010.

Dans le tertiaire (pour lequel une obligation de travaux de rénovation énergétique était déjà prévue dans la loi Grenelle 2 de 2010), cette exigence doit se traduire par un décret (en consultation fin octobre 2016) concernant les surfaces supérieures à 2000 m². Ce décret ajoute aux objectifs du Grenelle une obligation de réduction de consommation de 25 % à l'horizon 2020 (ou alternativement un seuil de consommation d'énergie primaire par m² et par an) et la fourniture d'un scénario de réduction de 40 % des consommations à l'horizon 2030. Aucune sanction n'est prévue dans le décret. Des alternatives sont possibles si les coûts sont excessifs (200€/m², et plus de 5 ans

de temps de retour sur investissement, durée portée à 10 ans pour l'État et les collectivités territoriales).

Ce point clé reste donc d'actualité et l'est même encore plus qu'en 2013, au vu des retards pris en matière de rénovation énergétique.

Le recours à des grands opérateurs est possible (l'obligation d'intervenir dans le cadre des certificats d'économie d'énergie pour lutter contre la précarité énergétique et les récentes initiatives d'EDF et ENGIE en matière d'autoconsommation vont en partie en ce sens¹⁵⁰), et les opérateurs fournisseurs d'énergie sont en effet en contact direct avec les clients / propriétaires. Ils peuvent fort bien connaître aussi la problématique des bâtiments ; leur intérêt à promouvoir un vecteur énergétique qui n'est pas le leur, mais une moindre consommation (malgré les obligations liées aux CEE) peut par contre demander examen.

Le recours aux opérateurs peut aussi s'appuyer, lorsque c'est possible, sur une industrialisation / standardisation grâce à une offre professionnelle organisée, et sur des plate-formes de rénovation énergétique aux compétences élargies.

Enfin, des objectifs globaux pourraient être fixés aux grands opérateurs propriétaires de parcs importants.

8° La compétition autour des techniques « bas carbone » est engagée au plan mondial. L'enjeu économique est immense et la recherche française a indubitablement des atouts. Le coût de l'électricité, moins élevé en France que chez ses voisins est un avantage immédiat pour la compétitivité des entreprises et le pouvoir d'achat des ménages, mais constitue un handicap pour la rentabilité économique des énergies renouvelables décarbonées, notamment éolienne et issue de la biomasse. D'autre part, la non répercussion du coût d'amortissement économique de l'appareil de production nucléaire sur le consommateur crée artificiellement une « rente » en sa faveur. Il faut donc mobiliser cette « rente » pour déployer dès maintenant les énergies renouvelables matures (notamment l'éolien terrestre) et financer la recherche sur les prochaines générations technologiques (panneaux photovoltaïque à haut rendement, batteries électrochimiques économiques, cycle hydrogène, capture et séquestration du carbone - CSC - nucléaire de 4e génération...).

Chacune de ces propositions peut être sujette à discussion au vu de l'évolution du contexte depuis 2013. La « rente » nucléaire n'est plus d'actualité en raison des difficultés actuelles de la filière (EPR,...). Le nucléaire de 4e génération -Astrid- est encore loin.

En revanche, les coûts des énergies renouvelables ont sensiblement baissés, que ce soit celui des cellules PV, critiquées par ailleurs pour leur empreinte carbone élevée si elles sont importées ou celui de l'éolien qui pose encore des problèmes d'acceptabilité. Celui des batteries, qui peuvent pallier l'intermittence des énergies renouvelables d'origine photovoltaïque ou éolienne, devrait diminuer dans les années à venir. Le déploiement des EnR matures et des techniques bas carbone reste prometteur,

¹⁵⁰ offre de la filiale spécialisée d'EDF, en autoproduction / autoconsommation solaire : <https://www.edfenr.com/> et en particulier, <https://www.edfenr.com/actualites/groupe-edf-officialise-virage-vers-lautoconsommation/>. Mais aussi offre d'ENGIE, « my power » : <http://www.engie-travaux.fr/production-d-electricite/travaux/autoconsommation-my-power-engie>

notamment en raison des fortes baisses de coûts et progrès techniques observés ces dernières années.

Des mécanismes d'achat des énergies renouvelables (afin de favoriser leur développement), font *in fine* reposer le surcoût sur le consommateur d'énergie. Les prix de l'électricité (essentiellement nucléaire) pour le particulier demeurent malgré tout à un niveau inférieur à celui pratiqué chez nos voisins (« rente nucléaire » telle qu'évoquée dans le rapport de 2013).

D'autres mécanismes d'appui existent comme le soutien au fonds chaleur pour une meilleure utilisation de la biomasse ou le soutien à la recherche.

En ce qui concerne le choix des thèmes de recherche, celui des batteries donne lieu à des travaux intéressants, le cycle hydrogène souffre de la faible présence en France des constructeurs automobiles de la filière, de son mode de production encore carboné, des coûts des équipements (piles à combustible, électrolyseurs) ; la CSC est chère en l'absence d'un prix du carbone, non maîtrisée, et peu acceptée .

9° La biomasse, en particulier le bois, doit être considérée d'abord comme un matériau et une source de matière première renouvelable susceptible de remplacer efficacement d'autres matériaux et sources d'énergie, en évitant des émissions de GES. Ce faisant, c'est en outre un outil peu onéreux pour capter et séquestrer du carbone : la gestion de la forêt française est un enjeu important pour l'économie des GES.

Ce point clé reste d'actualité. Des études récentes confirment l'utilité du bois matériau à des fins de stockage ou substitution afin d'atteindre un « temps de retour carbone » favorable, avant éventuel recyclage puis valorisation thermique. Et l'essor de la construction en bois est prometteur quoique encore modeste.

La gestion de la forêt française est effectivement un enjeu important qui n'est pas aujourd'hui totalement consensuel ;

10° Les déplacements de courte et moyenne distance (urbains et périurbains notamment) peuvent connaître une révolution en deux décennies, qui les amène à une décarbonation prononcée, grâce au développement des « modes doux » et des services partagés, mais aussi à des systèmes globaux intégrant véhicules électriques, stockages d'énergie liées à l'habitat, production locale d'énergies intermittentes décarbonées et « réseaux intelligents » (« smart grids »¹⁵¹), logistique décarbonée sur le dernier km, etc. Ces formes d'intégration, en 2012 encore loin de la rentabilité, pourront entrer dans le marché dans la décennie 2020-2030 et il faut s'y préparer dès maintenant.

Ce point clé est lié aux problématiques de l'« énergie 2.0 », de la domotique, de l'autoproduction et de l'autoconsommation. Bien que lié au secteur des transports, il peut être influencé par les obligations réglementaires de construire en 2018 des bâtiments neufs à énergie positive, qui elles aussi sont liées aux problématiques de l'énergie 2.0.

¹⁵¹ Il s'agit essentiellement de la démarche énergie 2.0 ou « 3^e révolution industrielle » portée par Jeremy Rifkin. En France quelques expériences ont lieu actuellement : Issy Grid, ...

Le développement des motorisations électriques est également lié à des politiques volontaristes de diffusion des véhicules électriques, par décision ou obligation d'incorporation dans les flottes importantes et par des incitations financières à compenser par des malus perçus sur d'autres véhicules.

11° La difficile question des comportements doit être approfondie : les Français ne donnent pas dans leur comportement une grande priorité à la lutte contre les émissions de GES. Il faut poursuivre les recherches permettant de comprendre comment parvenir à une mobilisation à la hauteur de l'enjeu, et entreprendre des efforts importants de pédagogie.

Ce point clé reste d'actualité et fait l'objet de mesures d'aide et d'animation notamment au travers des territoires à énergie positive. Il demeure une confusion entre économie d'énergie et émissions de GES, même si le comportement des ménages n'est en aucun cas nécessairement irrationnel.

Dans le secteur du bâtiment, outre les efforts d'appropriation des compteurs intelligents en cours de déploiement (Gazpar, Linky) ce sujet renvoie aussi aux problématiques comme la méconnaissance des systèmes provoquant des erreurs de prévision et de simulation, l'effet rebond, l'incitation à passer à l'acte, les changements progressifs de mentalité et de modèles de société et de consommation, etc.

Dans le secteur des transports les évolutions concernent la réduction des besoins (par exemple au moyen du télétravail), le choix des modes de déplacement, le recours au service et au partage plus qu'à la propriété.

Dans le secteur agricole, les tendances observées d'une part d'un manger local moins carné et d'autre part d'un recours plus important aux plats préparés en dehors du domicile ont des effets opposés sur les émissions de GES.

12° Enfin, il y a lieu de structurer une fonction d'observatoire de la lutte contre le risque climatique mettant en synergie la production de données (mesures d'émission, veille technologique et économique...) leur évaluation, la pédagogie et la mise en débat du « tableau de bord du facteur 4 » avec les parties prenantes. La forme à lui donner pourrait être mise à l'ordre du jour des débats sur la transition énergétique.

L'accès à des données utilisables et leur appropriation restent un débat récurrent, qu'il s'agisse des inventaires au niveau mondial, de l'harmonisation des comptabilités carbone, des statistiques d'émission ou autres. Certes la DGEC, l'ADEME, le CITEPA, ... suivent les émissions et disposent de tels tableaux de bord, il en existe bien d'autres déclinés secteurs par secteur ou au niveau global, et des efforts importants de publication et de pédagogie sont effectués. Cependant le sujet de la lutte contre le changement climatique reste un sujet très complexe, objet d'information foisonnante, nécessitant de la pédagogie, des présentations simplifiées et harmonisées, des références claires, des données indépendantes. À cet égard la COP21 a été une plate-forme puissante de sensibilisation, et la mise en œuvre de la LTECV et de la SNBC contribuent à une meilleure appropriation des sujets même si on constate encore la relative méconnaissance qu'en ont les acteurs.

5. Liste des personnes rencontrées

<i>Nom</i>	<i>Prénom</i>	<i>Organisme</i>	<i>Fonction</i>	<i>Date de rencontre (ou échange téléphonique)</i>
ACCHIARDI	Emmanuel	DGALN/DHUP	Sous directeur qualité de la construction	27 septembre 2016 (tél)
ALEXANDRE	Sylvie	CGEDD	Déléguée interministérielle pour la forêt et le bois	1e juin 2016
BOREL	Cédric	IFPEB	directeur	14 octobre 2016 (tél)
BOUCAULT	Christophe	USH	Directeur de la Maîtrise d'ouvrage et des Politiques patrimoniales	12 octobre 2016
BOY	Aline	MAAF/DGPE	Chargée de mission	2 novembre 2016
CAIRE	José	ADEME	Directeur villes et territoires durables	12 juillet 2016 (tél) 1 ^{er} septembre 2016 (tél) 4 octobre 2016 (tél)
CAUSSADE	Pierre	CGEDD	Co-coordonnateur collège aviation civile	26 septembre 2016
CORREZE-LENEE	Patricia	CGEDD	Membre	22 mars 2016, 1e juin 2016, 16 novembre 2016
CROGUENNEC	Stéphanie	DGEC/SCEE/DLCES	Chef du département de lutte contre l'effet de serre	18 novembre 2016
DELACHE	Xavier	DGITM/SAGS/EP	Sous-directeur des études et de la prospective	21 novembre 2016
DELALANDE	Daniel	DGEC	Conseiller du directeur général	18 novembre 2016, 21 novembre 2016
DELPONT	Sébastien	Greenflex	Directeur associé	23 août 2016
DOUCET	Jean-François	ENVIROBAT-BDM	Administrateur	12 juillet 2016
DRON	Dominique	CGE	Membre	11 février 2016, 22 mars 2016, 28 septembre 2016, 16 novembre 2016
DUPONT-KERLAN	Élisabeth	CGEDD	Présidente de la section transition énergétique construction innovations	1e juin 2016
DUPUIS	Pascal	DGEC/SCEE	Chef du service climat et efficacité énergétique	18 novembre 2016
DUTHILLEUL	Anne	CGE	Membre	29 septembre 2016
GATIER	Jérôme	DGALN	Directeur de la mission plan bâtiment	17 novembre 2016
GAVAUD	Olivier	DGITM/SAGS/EP/EP2	Chef du bureau des études économiques générales	21 novembre 2016
LAFFONT	Thierry	ADEME	Délégué régional PACA	13 juillet 2016 (tél)
LEMAITRE	Hélène	DGITM/SAGS/EP/EP2	Chargée d'étude	21 novembre 2016

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre (ou échange téléphonique)
MAGNIER	David	SOLIHA Ardèche	Directeur	2 septembre 2016
MALER	Philippe	CGEDD	Membre permanent	26 septembre 2016
MASSONI	Michel	CGEDD	Coordonnateur du collège économie et financement	1e juin 2016
MAUGARD	Alain	QUALIBAT	Président	26 septembre 2016 (tél)
MOULINIER	Jean-Marc	CGDD/SEEI/MA	Chargé de mission transports	2 décembre 2016
PELLETIER	Philippe	Plan bâtiment durable	Président	17 novembre 2016
PILLET	Didier	CGE	Membre	11 février 2016, 22 mars 2016, 28 septembre 2016, 16 novembre 2016
ROSA	Florence	ENVIROBAT-BDM	Présidente	12 juillet 2016
SCHAEFER	Jean-Pascal	ENVIROBAT-BDM	Directeur	12 juillet 2016
SCHWARTZ	Pierre	MAAF/DGPE	Chef du projet agroécologie	2 novembre 2016
TURENNE	Julien	MAAF/DGPE	Chef du service de la compétitivité et de la performance environnementale	2 novembre 2016

6. Glossaire des sigles et acronymes

<i>Acronyme</i>	<i>Signification</i>
ACV	Analyse en cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Ae	Autorité environnementale
AEE ou EEA	Agence européenne de l'environnement ou <i>European Environment Agency</i>
AIE ou IEA	Agence internationale de l'énergie ou <i>International Energy Agency</i>
Allenvi	Alliance nationale de recherche pour l'environnement
AME	Avec mesures existantes
AMS	Avec mesures supplémentaires
ANAH	Agence nationale de l'amélioration de l'habitat
ANCRE	Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie
ANR	Agence nationale de la recherche
BBC	Bâtiment basse consommation
BEPOS	Bâtiments à énergie positive
BTP	Bâtiment et travaux publics
CAE	Conseil d'analyse économique
Capex	<i>Capital expenditure</i> , en français coût d'investissement
CAS	Changement d'affectation des sols
CAS	Conseil d'analyse stratégique
CCmA	Courbe de coût marginal d'abattement
CCS	<i>Carbon capture and storage</i>
CCNUCC	Convention Cadre des Nations unies sur le Changement Climatique
CDC	Caisse des dépôts et consignations
CEE	Certificat d'économies d'énergie
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CGAAER	Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation, et de l'espace rural
CGDD	Commissariat général au développement durable
CGEDD	Conseil général de l'environnement et du développement durable
CGE ou CGEiet	Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies

Acronyme	Signification
CGPC	Conseil général des ponts et chaussées
CIDD	Crédit d'impôt développement durable
CIREN	Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
CITE	Crédit d'impôt transition énergétique
CITEPA	Centre interprofessionnel d'étude de la pollution atmosphérique
CmA	Coût marginal d'abattement
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
COP 21	21 ^{ème} Conférence des parties à la CCNUCC
CPE	Contrat de performance énergétique
CREDOC	Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie
CRF	<i>Common reporting format</i> (de la CCNUCC)
CSC	Capture et sequestration du carbone, voir CCS
CSF	Comité stratégique de filière
CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
CVT	Consortium de Valorisation Thématique
DDPP	<i>Deep decarbonization pathway project</i>
DEC	Scénario décarbonation par l'électricité du DNTE
DTEE	Démonstrateur pour la transition écologique et énergétique
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
DGCIS	Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services, devenue DGE
DGE	Direction générale des entreprises
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat
DGEMP-OE	Direction générale de l'énergie et des matières premières - Observatoire de l'énergie
DGPAAT	Direction générale des politiques agricoles, agroalimentaires et des territoires
DIV	Scénario diversification de la production énergétique du DNTE
DNTE	Débat national de la transition énergétique
éco PTZ	Prêt à taux zéro écologique
EDF/RetD	Électricité de France Recherche et développement
EFF	Scénario efficacité énergétique du DNTE
EnR	Énergies renouvelables
EPE	Entreprises pour l'environnement

Acronyme	Signification
EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
EPR	<i>European Pressurized Reactor</i> (réacteur pressurisé européen)
EU ETS	<i>European Union Emission Trading System</i> - système de quota d'émissions négociables , cf. SEQUE
EUROSTAT	Organe statistique de l'Union européenne
FNH	Fondation pour la Nature et l'Homme
FUI	Fonds unique interministériel
G8	Groupe des huit pays les plus industrialisés
GCIIE	Groupe de coordination et d'information sur les inventaires d'émissions
GES	Gaz à effet de serre
GIEC ou IPCC	Groupe intergouvernemental d'étude du climat ou <i>International Panel on Climate Change</i>
GIS	Groupement d'intérêt scientifique
GNV	Gan naturel véhicule
HFC	Hydrofluorocarbures
IAA	Industrie agroalimentaire
IFN	Inventaire forestier national
IFPEB	Institut français de la performance énergétique des bâtiments
IFSTTAR	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
IGN	Institut géographique national
ImaClim	Modèle hybride d'équilibre général calculable incluant des visions d'ingénieur au niveau sectoriel
INDC	<i>Intended nationally determined contribution</i>
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRA	Institut national de la recherche agronomique
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
INSPIRE	Directive européenne 2007/2/CE du 14 mars 2007 sur l'information géographique
LATTS	Laboratoire techniques territoires et société
LEPII	Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale
LET	Laboratoire d'économie des transports
Loi POPE	Loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique
LOLF	Loi organique relative aux lois de finance

Acronyme	Signification
LTECV	Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte
MAAF	Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et de la forêt
MAPTAM	Modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles
MDP ou CDM	Mécanisme de Développement Propre ou <i>Clean Development Mechanism</i>
MEDDE	Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
MEEM	Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer
MEGC	Modèle d'équilibre général calculable
MIES	Mission interministérielle de l'effet de serre
MOC ou JI credits	Mise en œuvre conjointe ou <i>Joint Implementation Credits</i>
MRAe	Mission régionale d'autorité environnementale
NAMEA	<i>National Accounting Matrix Including Environmental Accounts</i>
Némésis	<i>New Econometric Model of Evaluation by Sectoral Interdependency and Supply</i>
NOTRe	Nouvelle organisation territoriale de la république
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
OFCE	Observatoire français des conjonctures économiques
OMC	Organisation mondiale du commerce
OMI	Organisation maritime internationale
OMM	Organisation météorologique mondiale
Opex	<i>Operating cost</i> , en français coûts opérationnels = coûts des consommables et de fonctionnement
PAC	Politique agricole commune
PACTE-EDDEN	Politiques publiques, Action politique, Territoires (université de Grenoble) – Économie du développement durable et de l'énergie
PCAET	Plan climat-air-énergie territorial
PCET	Plan climat-énergie territorial
PEBN	Performance environnementale des bâtiments neufs
PFC	Perfluorocarbures
PIA	Programme des investissements d'avenir
PIB	Produit intérieur brut
PIPAME	Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques
PL	Poids lourd
PLETCV	Plan local pour la transition énergétique et la croissance verte

Acronyme	Signification
PNACC	Plan national d'adaptation au changement climatique
PNAQ	Plan national d'allocation de quota
PNFB	Programme national de la forêt et du bois
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
PPI	Programmation pluriannuelle des investissements
Ppm	Partie par million
PREDIT	Programme de recherche et d'innovation dans les transports
PRG	Pouvoir de réchauffement global
PTRE	Plate-forme territoriale de la rénovation énergétique
RAC	Réseau action climat
RATP	Régie autonome des transports parisiens
REACTIF	Recherche sur l'atténuation du changement climatique par l'agriculture et la forêt
RGE	Reconnu garant de l'environnement
RT 2005, RT 2012	Réglementation thermique de 2005, de 2012
SAU	Surface agricole utile
SCEQE	Système communautaire d'échange de quotas d'émission
SDMP	Stratégie pour le développement de la mobilité propre
SECTEN	Secteurs économiques et énergie (enquête CITEPA)
SEQE	Système (européen) d'échange de quota d'émissions, cf. EU ETS
SNBC	Stratégie Nationale Bas Carbone
SNBM	Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse
SNIT	Stratégie Nationale des Infrastructures de Transport
SNRE	Stratégie nationale de la recherche énergétique
SOB	Scénario sobriété du DNTE
SOeS	Service de l'observation et des statistiques
SRADDET	Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
SRB	Schéma régional biomasse
SRCAE	Schéma régional climat air énergie
STEP	Stations de transfert d'énergie par pompage

Acronyme	Signification
TC	Transport en commun
TCAM	Taux de croissance annuel moyen
t CO ₂ éq.	Tonne de CO ₂ équivalent (unité de pouvoir de réchauffement global)
Tep	Tonne d'équivalent pétrole
TEPCV	Territoire à énergie positive pour la croissance verte
TEPOS	Territoire à énergie positive
TER	Train express régional
TES	Tableau entrées-sorties
ThreeME	Modèle macroéconomique multisectoriel d'évaluation des politiques énergétiques et environnementales
TICPE	Taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques
TIPP	Taxe intérieure de consommation sur les produits pétroliers, ancêtre de la TICPE
TRI	Taux de rentabilité internes
TWh	Térawattheure = milliard de kilowattheures
UE	Union européenne
UFE	Union française de l'électricité
UNFCCC	<i>United nations Framework convention on climate change</i> , en français CCNUCC
UNTEC	Union nationale des économistes de la construction
UTCATF	Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et forêt
UTCf	Utilisation des terres, leurs changements et la forêt
VAN	Valeur actualisée nette
VE	Véhicule électrique
VH	Véhicule hybride
VHR	Véhicule hybride rechargeable
VL	Véhicules légers
VP	Véhicules particuliers
VUL	Véhicules utilitaires légers
WAM	<i>With additional measures</i> (AMS en français)
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WEM	<i>With existing measures</i> (AME en français)
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

Annexe thématique sur l'agriculture et l'utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCf)

Rapport n° 008387-02
établi par

Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF (coordonnateur), Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT

Février 2017



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités
passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction
de ce rapport.

Sommaire

1. L'agriculture.....	3
1.1. Des émissions stables en relatif, lentement décroissantes en valeur absolue.....	3
1.2. Des émissions essentiellement constituées de méthane et de N2O.....	3
1.3. Des variations récentes de méthodologie dans les inventaires.....	4
2. L'utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCF).....	7
2.1. L'UTCF a un bilan net d'absorption de plus de 10 % des GES émis en France.....	7
2.2. Un puits de carbone fluctuant.....	8
2.2.1. <i>Un puits de carbone à la hausse depuis 1990, mais en baisse récente.....</i>	<i>8</i>
2.2.2. <i>Le rôle dominant de la forêt.....</i>	<i>9</i>
2.2.3. <i>Des changements méthodologiques dans l'inventaire qui amplifient l'augmentation du puits de carbone entre 1990 et aujourd'hui.....</i>	<i>10</i>
2.3. La gestion forestière.....	14
2.3.1. <i>Un enjeu majeur.....</i>	<i>14</i>
2.3.2. <i>Une prise de conscience récente.....</i>	<i>15</i>
2.3.3. <i>Travaux du CCR en 2013, avis de l'ADEME en 2015, étude de l'INRA en 2016 sur la forêt et l'atténuation du changement climatique : pour une valorisation du bois « en cascade ».....</i>	<i>15</i>
2.4. Les cultures, prairies et zones humides.....	19
2.5. L'artificialisation.....	19
2.6. L'UE et les émissions du secteur Agriculture et UTCF	21
2.6.1. <i>Politique climatique, agriculture et UTCF.....</i>	<i>21</i>
2.6.2. <i>Politique agricole commune.....</i>	<i>23</i>
3. Des exercices de prospective concluant en général à un facteur deux au plus pour l'agriculture – exercices antérieurs à 2013.....	24
3.1. Prospective agriculture énergie 2030.....	25
3.2. Agriculture et effet de serre : état des lieux et perspectives – septembre 2010.....	26
3.3. Le rapport du conseil d'analyse stratégique « Trajectoires 2020 – 2050, vers une économie sobre en carbone », dit « De Perthuis » - novembre 2011.....	26
3.4. Feuille de route européenne pour une économie bas carbone compétitive en 2050 – 2011.....	28
3.5. Le scénario négaWatt – septembre 2011.....	28
3.6. Agriculture et Facteur 4 – juin 2012.....	29
3.7. Les scénarios ADEME 2030 et 2050 – novembre 2012.....	30
3.8. Le projet REACCTIF.....	30
4. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios postérieurs à 2013.....	31
4.1. Afterres 2050 – juillet 2013.....	31
4.2. Le rapport de l'INRA sur la contribution de l'agriculture à la réduction des émissions de gaz à effet de serre – juillet 2013.....	32
4.3. L'agriculture française face au défi climatique – octobre 2014.....	33

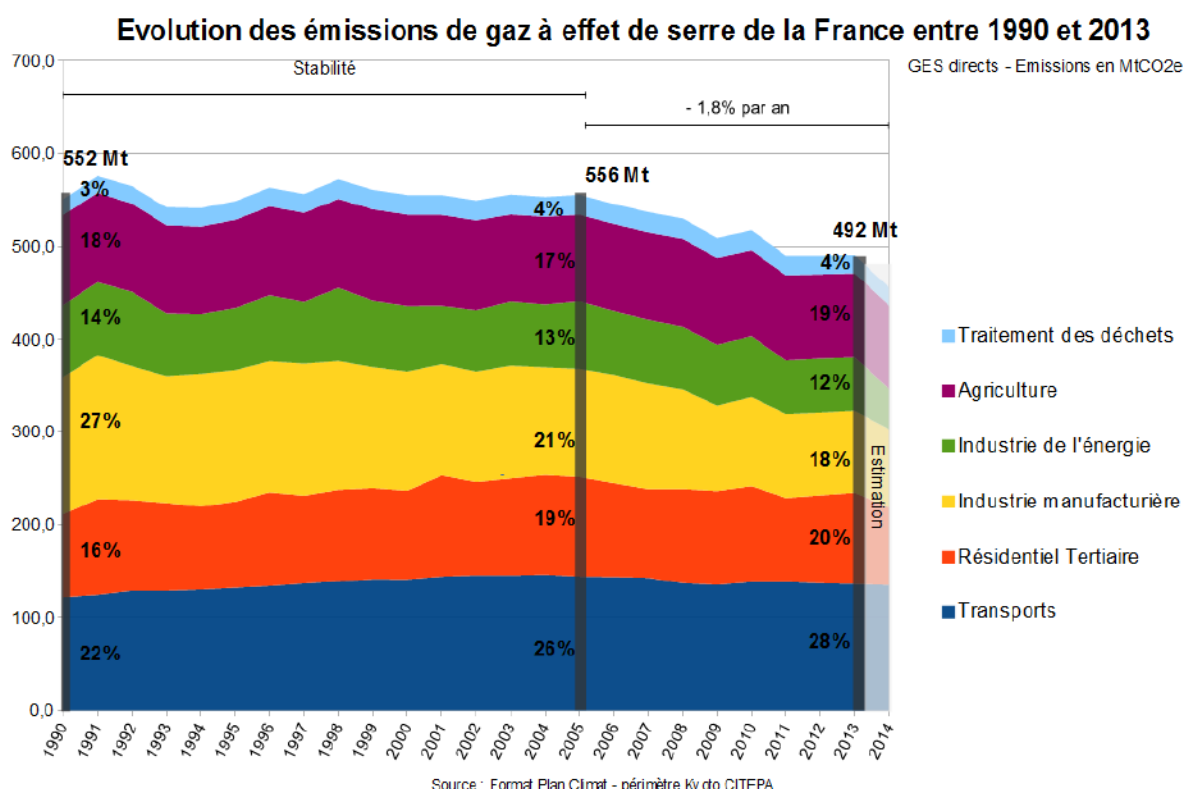
4.4. Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique – octobre 2014.....	37
4.5. La loi de transition énergétique pour la croissance verte – août 2015.....	38
4.6. Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035.....	38
4.7. La stratégie nationale bas carbone – novembre 2015.....	39
4.7.1. <i>Les budgets d'émission de la SNBC</i>	39
4.7.2. <i>Les émissions agricoles dans la SNBC</i>	40
4.7.3. <i>Le secteur UTCF dans la SNBC</i>	42
4.8. Analyse comparative par l'ADEME de scénarios agricoles, décembre 2015.....	43
4.9. Le programme national de la forêt et du bois – mars 2016.....	44
4.10. Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse.....	45
5. Problèmes et solutions.....	47
5.1. La difficile mesure des émissions liées à l'agriculture et l'UTCF.....	47
5.1.1. <i>Des incertitudes scientifiques</i>	47
5.1.2. <i>Des incertitudes liées aux formats et méthodes de mesure</i>	48
5.1.3. <i>Des répartitions parfois arbitraires</i>	48
5.2. Trajectoires de transition bas carbone en France au moindre coût.....	49
6. Synthèse pour le secteur de l'agriculture et l'UTCF.....	52
Recommandations du rapport de 2013 concernant le secteur de l'agriculture et l'UTCF.....	53

1. L'agriculture

1.1. Des émissions stables en relatif, lentement décroissantes en valeur absolue

Les émissions agricoles décroissent lentement en valeur absolue depuis 1990 et ont atteint 92,1 MtCO₂eq en 2013; en valeur relative, rapportées au total des émissions françaises, elles sont stables voire en légère croissance depuis 1990 et surtout 2005.

Les chiffres de l'inventaire CCNUCC relatifs à l'année 2013, publiés en 2015, pris en compte pour l'élaboration de la SNBC¹ et les publications des Chiffres clés du climat² par le SOeS dans son édition 2016 donnent la vision suivante de l'agriculture :



Source : SNBC, novembre 2015, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>

1.2. Des émissions essentiellement constituées de méthane et de N₂O

Le secteur de l'agriculture a une consommation d'énergie très majoritairement basée sur les énergies fossiles. Cette consommation génère des émissions de GES (surtout du CO₂), comptabilisés dans les inventaires CCNUCC sous la rubrique « CRF1A4c – autres utilisations de l'énergie ». Elles représentaient 12,6 Mt CO₂ eq en 2013 selon le

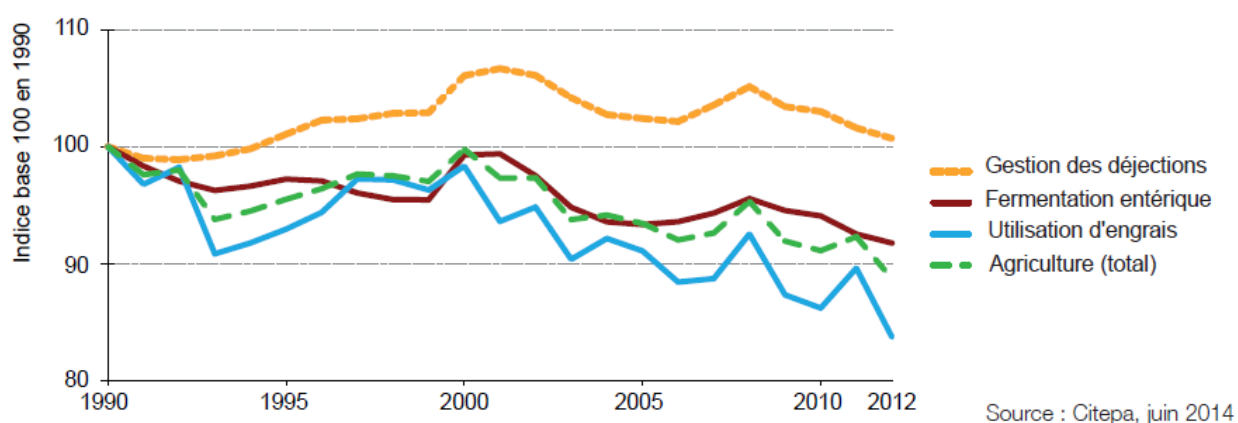
¹ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

² http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2015/reperes-chiffres-cles-climat-ed-2016.pdf

rapport 2015 et font partie des 92,1 Mt CO₂ éq précités. Mais le CO₂ n'est qu'un composant minoritaire des émissions de GES de l'agriculture.

Les sources principales d'émission de GES en agriculture (98 Mt CO₂ éq. en 1990, soit 17,7 % des émissions françaises ; 92,1 Mt CO₂ éq en 2013 soit 18,7 % des émissions voire 21 % des émissions anthropiques nettes³), tiennent en France pour l'essentiel :

- aux émissions de méthane CH₄ (pour 42 % des émissions, soit 38,7 Mt CO₂ éq. de CH₄ en 2013, soit 8 % des émissions nationales de GES) venant à 82 % du cheptel bovin, se décomposant en :
 - fermentation entérique des animaux d'élevage (plus de 80 % des émissions),
 - gestion des déjections des animaux d'élevage (environ 17 % des émissions),
- aux émissions de protoxyde d'azote ou gaz hilarant N₂O dues aux engrais (pour 43 % des émissions soit 39,6 Mt CO₂ éq. en 2013, soit encore 8 % des émissions totales de GES tous secteurs confondus).
- Et aux émissions dues à la consommation de combustibles (12,6 Mt CO₂ éq)



Émissions de GES de l'agriculture en France hors utilisation de l'énergie (DOM inclus) - Source : Chiffres clé du climat France et monde – édition 2016, CGDD/SOeS

1.3. Des variations récentes de méthodologie dans les inventaires

Le rapport d'inventaire CCNUCC le plus récent, publié en mars 2016⁴, modifie sensiblement les chiffres précédents. Les variations, pour la même année, par rapport à l'inventaire précédent sont d'environ 4 Mt CO₂ éq et sont dues à un changement de méthodologie, précisé ci-dessous.

L'inventaire donne les éléments suivants pour les émissions (hors utilisation d'énergie et UTCF) pour le périmètre de Kyoto (métropole et territoires d'outre-mer inclus dans l'UE comprenant la Guadeloupe, la Martinique, la Guyane, La Réunion, Mayotte à partir de 2014, et Saint-Martin)⁵:

³ Source : SNBC, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

⁴ http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/CCNUCC_france_2016_indB.pdf

⁵ <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/ccnucc>

AGRICULTURE (périmètre Kyoto)			Secteurs-d.xls	
Polluants	1990		2014	
	Emissions en CO2 eq (kt)	% du total national hors UTCF	Emissions en CO2 eq (kt)	% du total national hors UTCF
CO ₂	1 712	0.4%	1 944	0.6%
CH ₄	41 842	61.1%	39 916	67.3%
N ₂ O	39 598	58.7%	37 009	86.3%
HFC	0	0.0%	0	0.0%
PFC	0	0.0%	0	0.0%
SF ₆	0	0.0%	0	0.0%
NF ₃	0	0.0%	0	0.0%
PRG	83 152	15.2%	78 869	17.2%

CITEPA

Émissions de gaz à effet de serre de l'agriculture - Source : rapport CCNUCC de mars 2016, page 291, http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/CCNUCC_france_2016_indB.pdf

On constate qu'en valeur absolue les émissions de GES de l'agriculture ont baissé de 5 % en 34 ans, ce qui est très peu.

Ce dernier inventaire fournit également les valeurs suivantes en ce qui concerne l'origine des émissions.:

Emissions de GES directs au format "Plan Climat" en France (périmètre KYOTO) (2)														
Source CITEPA/ inventaire CCNUCC décembre 2015														
Secteurs	Cat. CRF	GES directs - Émissions en Mt CO ₂ e (1)												
		1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Agriculture/ sylviculture		94,9	92,7	96,3	91,5	91,2	91,9	92,5	91,7	90,2	90,1	89,3	89,0	91,7
Consommation d'énergie	1A4c	11,7	12,2	12,5	13,0	12,6	12,3	12,5	12,4	12,3	12,6	12,1	13,0	12,7
Sols agricoles	3D, 3G, 3H	38,4	36,8	38,9	36,5	36,1	36,9	37,0	36,5	35,7	35,2	35,8	35,3	36,6
Fermentation entérique	3A	36,6	35,5	36,2	33,7	33,8	34,1	34,6	34,2	34,0	33,5	33,2	33,2	33,7
Déjections animales	3B	7,9	7,9	8,4	8,0	8,3	8,2	8,2	8,1	7,8	8,4	7,9	7,1	8,3
Culture du riz	3C	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Bruilage de résidus de récolte	3F	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Consommation de gaz fluorés	2F (p)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Source : rapport CITEPA Inventaire CCNUCC, mars 2016

Le rapport CCNUCC 2016 détaille la raison des révisions à la baisse des émissions du secteur agricole qui concernent toute la période 1990-2014 :

pour la gestion des déjections, les températures prises en compte ont été revues, de même que le facteur d'excrétion des ovins, les facteurs d'émission pour les volailles au stockage et la quantité de paille prise en compte dans les bâtiments d'élevages, amenant à des diminutions de 0,6 Mt CO₂ éq en 1990 et 1,0 Mt CO₂ éq en 2013 ;

pour les émissions liées aux sols, les émissions liées à la minéralisation des terres devenant cultures ont été transférées dans la rubrique UTCF, tandis que les émissions de N₂O indirectes ont été ajustées en cohérence avec le recalcul des émissions

d'ammoniac, amenant à des diminutions de 2,7 Mt CO₂ éq en 1990 et 2,5 Mt CO₂ éq en 2013.

On retrouve ainsi la cohérence des chiffres :

Émissions en Mt CO ₂ éq	Inventaire CCNUCC 2015 (SNBC)	Valeur CCNUCC 2016 sans émissions liées à l'énergie	Correction méthodologique rapport 2016	Inventaire CCNUCC 2016	Valeur CCNUCC 2016 sans émissions liées à l'énergie
Total Agriculture 1990	98	86,3	- 3,3	94,7	83
Total Agriculture 2013	92,1	79,5	- 3,5	89,0	75,6
Total agriculture 2014				91,7	79

Tableau 1 : Valeurs des émissions de l'agriculture et de la sylviculture en 1990, 2013 et 2014 selon les inventaires successifs

On observe donc une forte incertitude sur les estimations en fonction des méthodologies, toujours perfectibles. Les chiffres cependant sont utilisables en ordre de grandeur, et aussi en tendance.

Une particularité des émissions agricoles est qu'elles sont diffuses, à la différence des autres émissions, industrielles notamment (émissions concentrées assujetties au secteur ETS -emission trading system- qui couvre les « gros émetteurs»). Les émissions non assujetties à l'ETS, dites émissions ESD, sont plus diffuses, mais souvent concentrées linéairement (transports) ou sur des zones urbaines (bâtiments). Le secteur agricole est à ce titre le plus « diffus ».

2. L'utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCF)

Les modes de comptabilité pour l'UTCF qui seront utilisés par la suite sont essentiellement les modes de comptage de l'inventaire « Kyoto » et de l'inventaire CCNUCC (voir annexe relative aux formats des rapports d'inventaire d'émission). Il convient de préciser que le format Kyoto est basé sur des activités, souvent estimées conventionnellement, tandis que le format CCNUCC est rapporté aux terrains.

2.1. L'UTCF a un bilan net d'absorption de plus de 10 % des GES émis en France

Les sols agricoles et forestiers et les productions qu'ils portent constituent d'importants réservoirs de carbone. Ils peuvent absorber du gaz carbonique (CO₂) plus qu'ils n'émettent de GES et fonctionner alors comme « puits ». Mais l'inverse est également possible : dans certaines conditions, ils deviennent des « sources ». Les changements de vocation des sols agricoles sont à effet « source » dans le cas de retournement des prairies pour la mise en cultures labourées, et de « puits » dans le cas contraire.

Il faut aussi rappeler que dans le secteur UTCF, les gaz à effet de serre sont considérés comme émis et comptés à la récolte, ce qui fait que pour éviter les doubles comptes leur contribution aux émissions de combustion est nulle.

Les émissions liées à l'UTCF sont négatives en France et dans l'Union européenne, c'est-à-dire que l'UTCF a un bilan net d'absorption des gaz à effet de serre ; les émissions positives liées aux cultures (plus de 21 Mt CO₂ éq en 2014⁶) et aux sols artificialisés (plus de 11 Mt CO₂ éq en 2014) sont plus que compensées par la forêt et dans une moindre mesure les prairies, le « puits » qui en résulte au final est estimé à plus de 50 Mt CO₂ éq en 2014.

Chaque année la France notifie à la CCNUCC ses données d'inventaires, chaque notification annuelle met à jour la précédente. Le rapport CCNUCC de Mars 2016 fournit les données suivantes:

⁶ Voir rapport CCNUCC 2016 page 493 http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/CCNUCC_france_2016_indB.pdf

(Mt CO ₂ éq)	1990	2013	2014	Variation 1990-2014
Total Usage des terres, changement usage des terres et forêts	- 30,5	-53,5	- 50,6	+65 %
Dont forêts	- 39,5	-71,8	- 69,5	+76 %
Dont cultures	+ 23,9	+21,5	+ 21,5	-9 %
Dont prairies	-16,5	-10,7	-10,3	-38 %
Dont zones humides	-1,7	-2,1	- 2,0	+18 %
Dont artificialisation	+10,3	+11,8	+ 11,6	+12 %
Dont produits bois	-7,2	-2,5	-2,2	- 70 %

Tableau 2 : Émissions de GES dues à l'UTCF en France, - Source, inventaire CCNUCC de mars 2016 page 485

Il faut noter que le tableau correspondant selon l'inventaire CCNUCC de 2015 présente des données différentes, avec des valeurs absolues 20 % plus élevées en 1990 et plus de 10 % plus faibles en 2013, ce qui amplifie les variations. Ceci montre la fragilité des chiffres et la nécessité de surtout considérer les ordres de grandeur et les tendances. Ce point est détaillé *infra*.

2.2. Un puits de carbone fluctuant

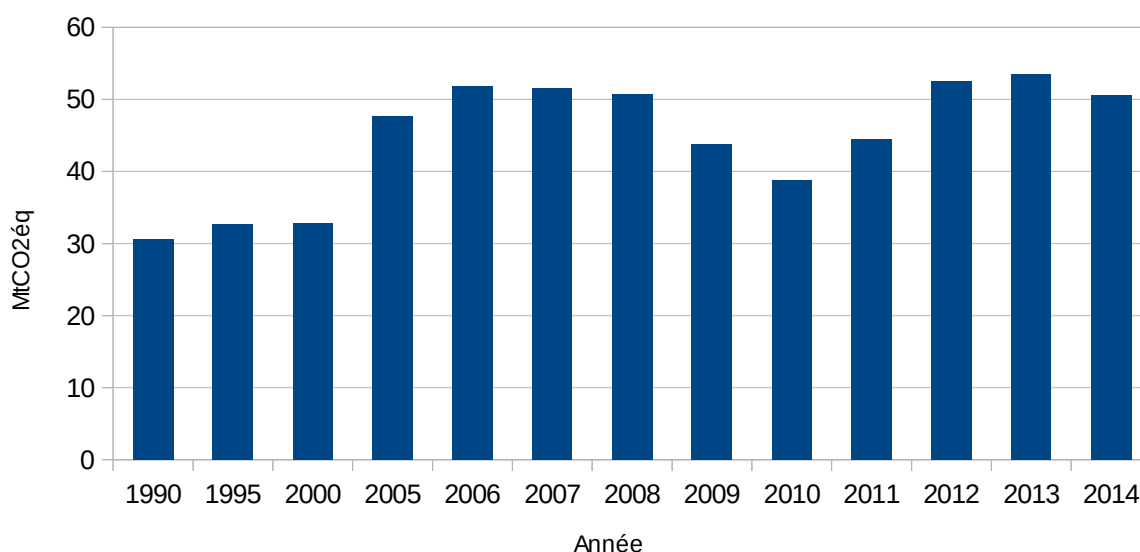
2.2.1. Un puits de carbone à la hausse depuis 1990, mais en baisse récente

L'évolution des émissions du secteur UTCF (et sa contribution aux émissions agricoles et sylvicoles) est la suivante (ligne du milieu) :

Emissions de GES directs au format "Plan Climat" en France (périmètre KYOTO) (2)															
Source CITEPA/ inventaire CCNUCC décembre 2015												PlanClimat-Kyoto-ed6avril16.xlsx			
	Cat. CRF	GES directs - Émissions en Mt CO ₂ e (1)												Evolution 90-2014	
		1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013		2014
Total hors UTCATF		548,1	547,0	554,3	554,8	543,1	534,0	527,2	506,5	514,5	487,0	488,4	486,5	458,9	-16,3%
UTCATF	4	-30,6	-32,6	-32,8	-47,8	-51,9	-51,8	-50,8	-43,8	-38,8	-44,5	-52,5	-53,5	-50,6	65,6%
Total		517,5	514,4	521,6	507,0	491,2	482,2	476,3	462,7	475,8	442,5	435,8	432,9	408,3	-21,1%

Émissions françaises, avec et sans l'UTCF – source, inventaire CCNUCC de mars 2016

Evolution du puits format Kyoto



Évolution du puits de carbone de l'UTCF de France et outre-mer inclus dans l'UE entre 1990 et 2014 - Source : CITEPA, basé sur les chiffres du Rapport d'inventaire CCNUCC de mars 2016

La figure ci-dessus doit être examinée avec prudence, notamment en raison des échelles de gauche (quinquennales) avec une rupture et un passage en annuel à partir de 2005. Les effets des tempêtes de 1999 n'apparaissent notamment pas ici (pour les voir, cf figure *infra*). On note une forte baisse en 2009, a priori liée à la tempête Klaus de 2009, baisse qui se poursuit en 2010.

2.2.2. Le rôle dominant de la forêt

Si l'on se limite à la forêt, le rapport CCNUCC donne les éléments suivants pour le périmètre de Kyoto (métropole et territoires d'outre-mer inclus dans l'UE comprenant la Guadeloupe, la Martinique, la Guyane, La Réunion, Mayotte à partir de 2014, et Saint-Martin) :⁷

⁷ <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/ccnuc>

Gg CO ₂ e	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Activités article 3.3	7 932.40	6 203.90	3 956.51	1 889.18	1 465.16	1 106.81	546.43
A.1. Boisement-reboisement	-7 919.52	-8 441.17	-8 535.45	-9 010.55	-9 423.27	-9 777.89	-10 257.11
A.2. Défrichement	15 851.92	14 645.06	12 491.96	10 899.73	10 888.43	10 884.70	10 803.54
Activités article 3.4	-65 742.55	-58 037.54	-48 886.68	-52 683.99	-61 417.06	-64 639.88	-64 952.63
B.1. Gestion forestière sans PLR	-65 742.55	-58 037.54	-48 886.68	-52 683.99	-61 417.06	-59 452.07	-59 985.11
B.1 Produits Ligneux Récoltés (PLR)						-5 187.81	-4 967.51
B.3. Gestion des prairies	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B.2. Gestion des cultures	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B.4. Revégétalisation	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
B.5 Drainage des zones humides et réhumidification	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Émissions (négatives, correspondant à un puits) liées à la forêt de France métropolitaine et outre-mer inclus dans l'UE - Source : Rapport CCNUCC 2015, page 419

2.2.3. Des changements méthodologiques dans l'inventaire qui amplifient l'augmentation du puits de carbone entre 1990 et aujourd'hui

Le rapport CCNUCC publié en mars 2016⁸ décrit et détaille dans son annexe 6 des différences sensibles dans les méthodologies entre le rapport 2016 (résultats 2014 et antérieurs) et le rapport 2015 (résultats 2013 et antérieurs), essentiellement du fait d'une réévaluation de la dynamique de transformation de terres en forêts. Avec la prise en compte de ces modifications, le puits est plus faible en 1990 (sa valeur est ramenée de -37,5 à -30,5 Mt CO₂ eq), mais est réévalué à la hausse pour les années récentes (de -46,5 à - 53,5 Mt CO₂ eq pour 2013)

Cette réévaluation explique les différences avec les chiffres figurant dans la SNBC, basés sur le rapport CCNUCC précédent publié en 2015, et présentés ci-après.

⁸ http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/CCNUCC_france_2016_indB.pdf

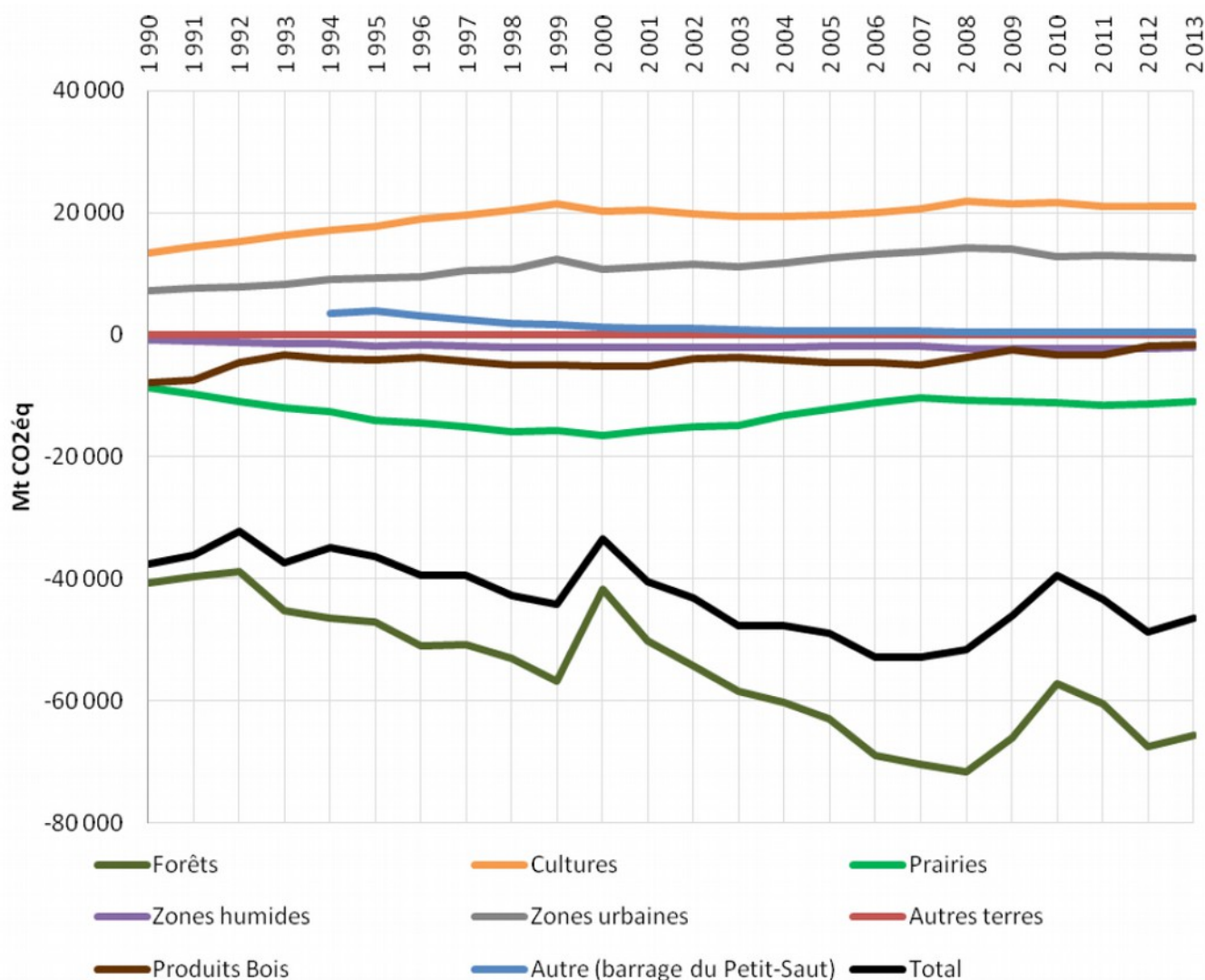
UTCf (périmètre Kyoto)			Secteurs- d.xls	
Polluants	1990		2013	
	Emissions en CO2 eq (kt)	% du total national hors UTCf	Emissions en CO2 eq (kt)	% du total national hors UTCf
CO ₂	-39 105		-48 110	
CH ₄	1 319		1 321	
N ₂ O	175		116	
HFC	0		0	
PFC	0		0	
SF ₆	0		0	
NF ₃	0		0	
PRG	-37 611		-46 673	

CITEPA

*Émissions de gaz à effet de serre de l'UTCf en 1990 et 2013 - Source :
rapport 2015 CCNUCC chiffres pour 2013*

Secteur UTCATF									
An- née	Forêts	Cultures	Prairies	Zones hu- mides	Zones ur- baines	Autres terres	Produits Bois	Autre (barrage du Petit- Saut)	Total
1 990	-40 785,11	13 481,45	-8 649,23	-923,59	7 162,67	0,16	-7 810,20		-37 523,85
2 013	-65 596,10	20 961,38	-11 040,29	-2 185,17	12 618,84	0,16	-1 652,60	327,53	-46 566,24

*Émissions de gaz à effet de serre de l'UTCf en 1990 et 2013 - Source :
annexe de la SNBC, d'après le rapport d'inventaire CCNUCC de 2015*

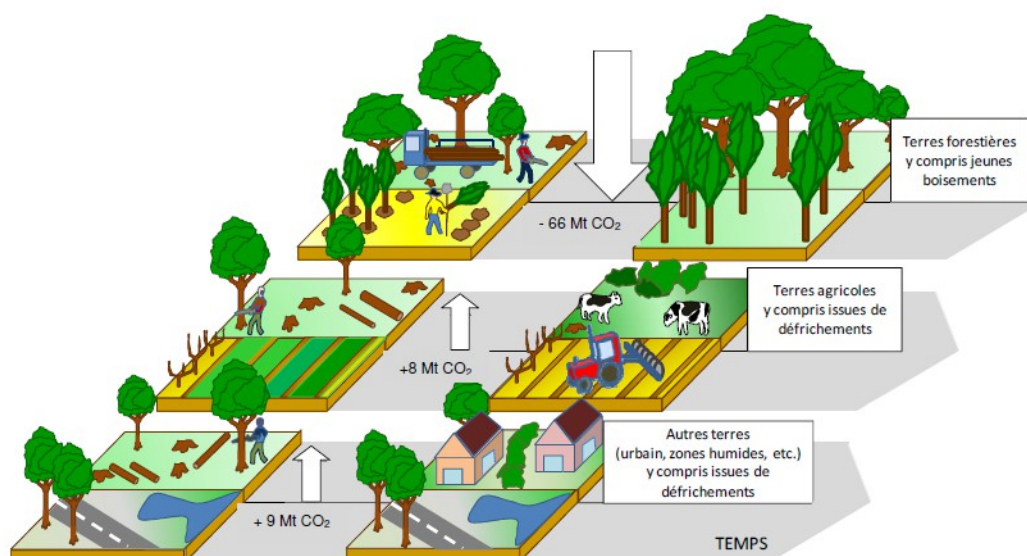


Contribution des différentes composantes de l'UTCF - Source : annexe SNBC, d'après le rapport d'inventaire CCNUCC de 2015

On note sur la dernière figure les effets des tempêtes de 1999 et 2009. D'une certaine manière, les tempêtes récoltent les excédents de production, sans aucun profit, générant même de fortes réductions du puits.

En résumé, et pour la France métropolitaine⁹, « Le bilan net de l'UTCF en métropole correspond, en 2013, à un puits de 50 Mt de CO₂ avec une moyenne sur la période 2008-2013 de 49 Mt de CO₂ de puits ce qui revient à une augmentation de 41% (14 Mt) par rapport au bilan de 1990 (puits de 36 Mt). En prenant en compte les flux de N₂O et de CH₄, associés, le bilan net de l'UTCF est ramené à un puits de 49 Mt de CO₂ éq, en grande partie dû aux terres forestières, dont le puits est estimé pour cette même année à 66 Mt de CO₂ éq ».

⁹ Source : rapport SECTEN d'avril 2015, www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/secten_avril2015_sec.pdf



Représentation des flux de gaz à effet de serre estimés en métropole sur la période 2008-2013 en séparant les principales utilisations des terres.

Source : rapport national d'inventaire (rapport dit SECTEN), avril 2015, CITEPA, p. 201

Pour l'outre-mer, selon la SNBC¹⁰, « Les données scientifiques actuelles ne permettent pas d'estimer le puits forestier des DOM, l'hypothèse a priori conservatrice d'un puits nul a été retenue. Par contre, le bilan boisement/déboisement est connu et fait apparaître la Guyane et les Antilles comme émetteurs nets. Rapporté à leur surface forestière, ce sont les régions les plus émettrices de France. L'inventaire remis à la CCNUCC dans le cadre du Protocole de Kyoto montre que les déboisements guyanais comptent pour 15 % des superficies déboisées (de l'ordre de 5 000 ha/an), mais pour plus de 45 % des GES émis. »

La Guyane représente environ le tiers du couvert forestier français, avec environ 8 millions d'hectares. Il est donc important de progresser vers une intégration plus complète des données guyanaises.

Un rapport a été publié en mai 2016 précisant une méthodologie d'inventaire des GES dans le cas de la Guyane par l'observatoire guyanais du carbone et de l'effet de serre, le CIRAD et l'ONF Guyane. Son bilan global montre qu'il y a encore de grands progrès à accomplir, et que les données actuelles sont probablement largement sous-estimées.

En tout cas, s'agissant d'environ un tiers du couvert forestier français, le point ne peut être négligé.¹¹

Pour revenir aux données les plus récentes et corrigées du rapport d'inventaire CCNUCC de 2016, le bilan total UTCF (Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt ; en anglais LULUCF) de la France entière est un puits net en augmentation depuis 1990 (- 30,5 Mt CO₂ éq en 1990. à - 50,6 Mt CO₂ éq. en 2014). Le puits de la

¹⁰ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

et

¹¹ méthodologie d'inventaire des GES dans le cas de la Guyane
<https://drive.google.com/file/d/0Bz9caW01K0mzY29UNGZmMkFMU0k/view>

forêt (malgré un recul de la forêt guyanaise) est passé sur la même période de - 39,5 Mt CO₂ éq. À - 69,5 Mt CO₂ éq. La différence est essentiellement due au retournement des prairies¹² (qui a diminué) et à l'artificialisation des sols (qui a augmenté).

Il convient de préciser que les estimations sont sujettes à de fortes marges d'incertitude.

L'UTCF est aussi un enjeu¹³ au titre des engagements liés au protocole de Kyoto. Il n'était pas couvert par les objectifs, a été cependant partiellement pris en compte dans la première période des engagements (2008-2012) et a permis à la France de compenser ses émissions à hauteur de 5 Mt CO₂ éq/an au titre de la gestion forestière, et de 3,2 Mt CO₂ éq sur la période au titre du plafond de puits. À partir de 2013, les règles ont changé, le niveau de référence est fixé sur la période 2013-2020. « *Pour la seconde période d'engagement, l'estimation des flux liés à la gestion des cultures et de la gestion des prairies devient obligatoire pour les États membres de l'Union européenne. Une harmonisation des méthodologies est prévue pendant cette période.* ».

2.3. La gestion forestière

2.3.1. Un enjeu majeur

Cependant le projet de « Rapport initial de la France au titre du protocole de Kyoto et de l'amendement de Doha », en date de juin 2016, basé sur l'inventaire de 2014 incluant désormais Mayotte, indique que « *Le nouveau niveau de référence forestière pour la France est -45 615 Ktonnes d'éq. CO₂* ». L'écart avec l'estimation de 2011 par le centre commun de recherche européen (en anglais JRC, joint research center) est de 18 Mt CO₂ éq, ce qui illustre la fragilité des méthodes comptables basées sur des estimations de l'activité de gestion forestière, les divergences entre comptabilités basées sur l'usage des sols (rapportage CCNUCC) et comptabilités basées sur les « activités liées aux sols », et la dépendance des niveaux de référence aux modèles utilisés.

La gestion forestière peut avoir un impact sur l'absorption de carbone sous forme de CO₂ : une forêt jeune continue de croître et d'absorber du carbone, alors qu'une forêt qui vieillit en absorbe de moins en moins jusqu'à devenir émettrice nette (effet de saturation), la croissance ne permettant plus de compenser les émissions liées à la minéralisation des litières et du bois mort.

La forêt française est un puits de CO₂ très important qui a augmenté en valeur absolue d'environ 70 % sur la période 1990 – 2014, essentiellement par accumulation de biomasse dans les forêts de métropole (la production est aujourd'hui supérieure de 40 % à son niveau de 1980, alors que la récolte est inférieure à la production depuis 40 ans). À long terme (quelques décennies), le puits forestier est menacé si les peuplements restent insuffisamment renouvelés.

¹² Dont indirectement à la PAC politique agricole commune, qui ne prend pas (encore) en compte le carbone. De manière générale on peut se poser la question de l'internalisation des GES dans les politiques publiques : carbone en agriculture, poids carbone des infrastructures dans les transports, dans l'artificialisation des terres etc.

¹³ <http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/analyse-sectorielle/foret>

La forêt et la destination du bois constituent donc un enjeu majeur : la photosynthèse est aujourd'hui de loin le processus le plus économique pour capter et stocker du CO₂. Cette ressource mérite une plus grande attention¹⁴.

2.3.2. Une prise de conscience récente

Le rapport CGEDD de 2013, dont le présent rapport est l'actualisation, déplorait la baisse des prix du bois matériau qui handicapait la mobilisation de la ressource, les tendances récentes (2016) sont plutôt à la hausse ; il recommandait d'« Envisager le bois stocké, comme un moyen compétitif de stockage et de séquestration du carbone, et mettre en œuvre un programme cohérent de mobilisation et de valorisation de la ressource forestière » et de « Développer des modélisations sylvicoles et économiques permettant de répondre à la nécessité d'une gestion plus active des forêts, en réponse aux besoins d'atténuation et d'adaptation aux effets du changement climatique ».

L'essor récent de la construction en bois témoigne d'une prise de conscience en la matière. Et la SNBC¹⁵, suivant les recommandations d'un rapport CGEDD-CGEiet-CGAAER de septembre 2012¹⁶ et d'un rapport CGAAER d'octobre 2014¹⁷, identifie comme levier important de lutte contre le changement climatique le recours au matériau bois en substitution aux matériaux énergivores (acier, ciment, plastique). Un autre levier important identifié est la valorisation énergétique de la biomasse forestière en substitution aux combustibles fossiles. Le stockage de carbone dans les produits bois et la séquestration du carbone dans l'écosystème forestier complètent les leviers d'action de la forêt bois.

2.3.3. Travaux du CCR en 2013, avis de l'ADEME en 2015, étude de l'INRA en 2016 sur la forêt et l'atténuation du changement climatique : pour une valorisation du bois « en cascade »

Ces analyses sont confirmées par un avis de l'ADEME de juin 2015, intitulé « forêt et atténuation du changement climatique »¹⁸. En substance, l'avis fait le constat que la filière bois énergie est appelée à se développer dans le contexte de la transition énergétique, mais que l'intensification des prélèvements en bois peut avoir pour conséquence de diminuer le rythme de séquestration du carbone dans les écosystèmes même si les stocks croissent.

Il est donc nécessaire de compenser ce manque de séquestration en procédant à la séquestration additionnelle dans les produits bois pendant une durée suffisante, au-delà de laquelle le bilan est positif. C'est la notion de « temps de retour carbone », illustrée *infra*.

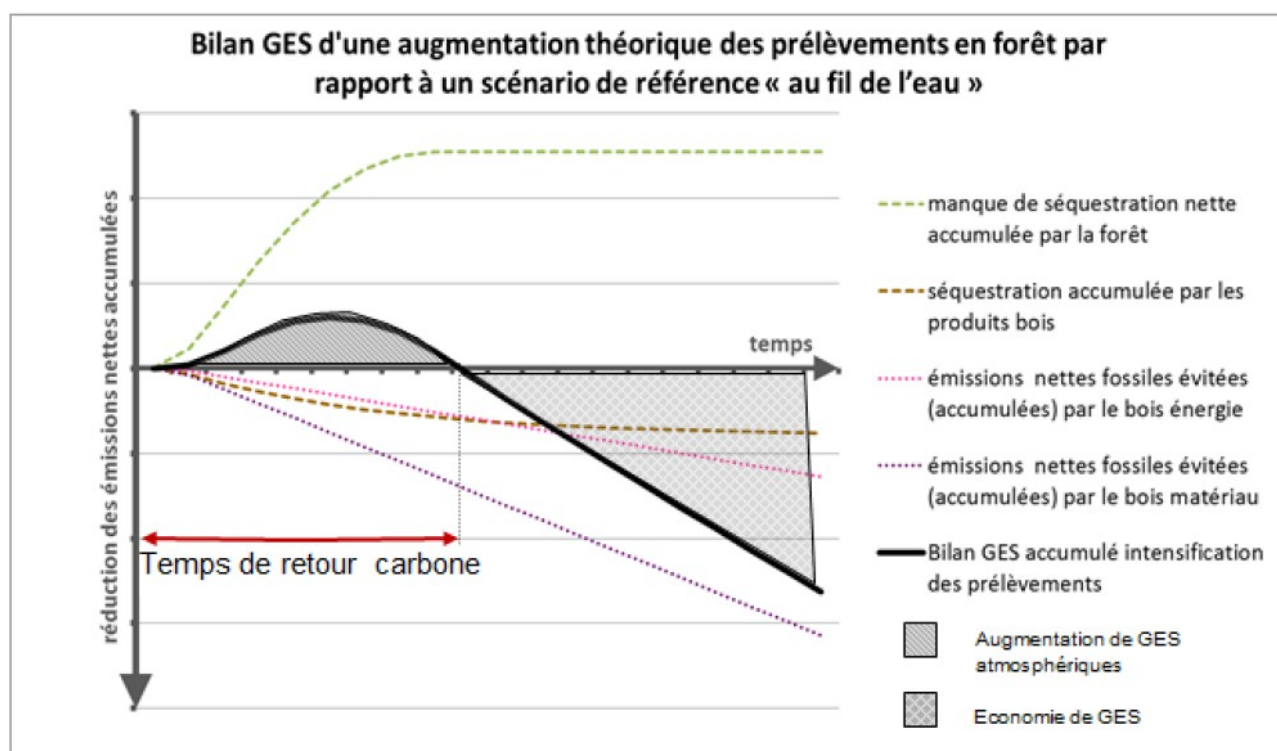
¹⁴ Cette analyse est partagée par l'ADEME.

¹⁵ Source : SNBC, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf p. 218

¹⁶ « Les usages non alimentaires de la biomasse », septembre 2012, http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Cgpc-CGEQV00125090&n=1&q=%28%2B%28sujet_word%3Abiomasse+sujet%3A%7Cbiomasse%7C%29%29&fulltext=&depot=&

¹⁷ <http://agriculture.gouv.fr/telecharger/57006?token=f89b653b919a60bfed3633e8e288c3bf>

¹⁸ http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis_ademe_foret-attenuation-cght-clim_vdef.pdf



Représentation schématique du bilan « effet de serre » d'une augmentation théorique des prélèvements en forêt – Source, ADEME 2015, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis_ademe_foret-attenuation-cght-clim_vdef.pdf

Le même avis de l'ADEME cite aussi une étude du Centre Commun de Recherche européen (CCR, en anglais JRC, Joint Research Center), qui compare aussi les émissions nettes de GES du système bois énergie vis-à-vis du système de recours aux énergies fossiles, selon les temps de retour.

Biomass source	CO ₂ emission reduction efficiency					
	Short term (10 years)		Medium term (50 years)		Long term (centuries)	
	coal	natural gas	coal	natural gas	coal	natural gas
Temperate stemwood energy dedicated harvest	---	---	+/-	-	++	+
Boreal stemwood energy dedicated harvest	---	---	-	--	+	+
Harvest residues*	+/-	+/-	+	+	++	++
Thinning wood*	+/-	+/-	+	+	++	++
Landscape care wood*	+/-	+/-	+	+	++	++
Salvage logging wood*	+/-	+/-	+	+	++	++
New plantation on marginal agricultural land (if not causing iLUC)	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Forest substitution with fast growth plantation	-	-	++	+	+++	+++
Indirect wood (industrial residues, waste wood etc)	+++	+++	+++	+++	+++	+++

+/-: the GHG emissions of bioenergy and fossil are comparable; which one is lower depends on specific pathways,

-; --; ---: the bioenergy system emits more CO₂eq than the reference fossil system

+, ++, +++: the bioenergy system emits less CO₂eq than the reference fossil system

*For residues, thinning & salvage logging it depends on alternative use (roadside combustion) and decay rate

Évaluation du délai de temps de retour carbone sur la récolte additionnelle de bois est destinée à un usage – Source, Centre de recherche de la commission européenne(JRC), 2013,

<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC70663>

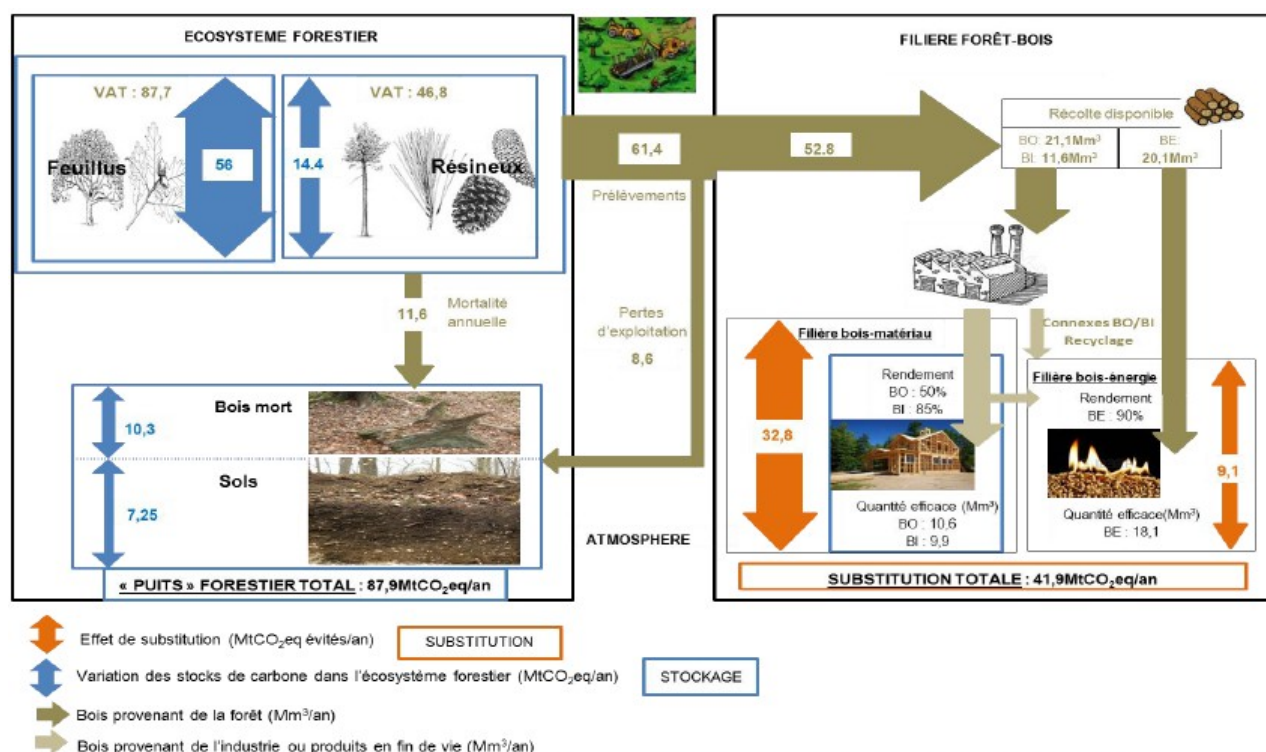
Ainsi on constate qu'à moyen et surtout long terme la récolte de gros bois de tige pour l'énergie, la récolte de résidu d'exploitation, la récolte après événements extrêmes, les travaux sylvicoles de prévention, la substitution par forêt à croissance rapide, ont un bilan meilleur que le système fossile. Et à court terme, les plantations nouvelles sur terrain agricole marginal, ou l'exploitation du bois « indirect » (résidus industriels, déchets) l'emportent aussi nettement sur le scénario de référence fossile.

L'avis de l'ADEME constate l'importance de l'effet de substitution consécutif à l'utilisation du bois matériaux (en moyenne 1,1 tCO₂eq évité par m³ de bois contenu dans les produits finis¹⁹) double de l'effet de substitution énergétique (1 m³ de bois rond utilisé en production de chaleur évite environ 0,5 tCO₂). Il conclut à l'utilité d'une approche en analyse du cycle de vie, et spécifiquement d'une optimisation du recours au bois grâce à une « cascade » d'utilisations successives : d'abord utilisation en bois matériau, puis recyclage, et enfin valorisation énergétique lorsque le recyclage en matériau n'est plus possible.

Enfin, l'étude « Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 »²⁰ réalisée par l'INRA pour le compte du MAAF en 2016 traite des leviers forestiers permettant d'atténuer les

¹⁹ La récente étude CLIMWOOD 2030 fixe une fourchette entre 1,5 et 3,5 téqCO₂/tonne de bois. Cf. <http://www.holzundklima.de/projekte/climwood2030/docs/flyer-ClimWood2030.pdf>

émissions nettes de CO₂ de la France. Le périmètre géographique est la France métropolitaine. L'étude présente le flux de matière et de dioxyde de carbone de la filière bois.



Flux de matière et de CO₂ aux différents stades de la filière forêt-bois française en 2013²¹ – Source, « Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 », synthèse, <http://agriculture.gouv.fr/telecharger/81463?token=2a4e0b2367642981a872805cf81ba4f2>

Elle propose un mode de calcul permettant d'évaluer le potentiel d'atténuation des émissions de CO₂ lié à la filière-bois française aux horizons 2020, 2030, 2050, et « confirme l'importance de la compensation d'une diminution du stockage de carbone dans l'écosystème due à un accroissement des prélèvements forestiers, par un stockage proportionnellement moindre dans les produits bois et un effet de substitution dû au remplacement par le bois de matériaux et énergies fossiles au bilan carbone moins favorable ».

Une gestion plus active des forêts constitue une réponse à la fois aux enjeux d'atténuation et aux enjeux d'adaptation des forêts aux effets du changement climatique: les travaux de la recherche devraient, à la lumière des acquis scientifiques des dernières années, aider la modélisation sylvicole et économique et éclairer la

²⁰ <http://agriculture.gouv.fr/leviers-forestiers-en-termes-dattenuation-pour-lutter-contre-le-changement-climatique-aux-horizons>

²¹ VAT=Volume aérien total, BO=Bois d'œuvre, BI=Bois d'industrie, BE=Bois énergie ; par ailleurs, pour fixer les idées et faciliter les conversions, le pouvoir calorifique du bois dépend fortement du taux d'humidité mais est typiquement (pour une humidité de 15-17%) de 4 kWh/kg, et aussi (rapporté au volume en stères), de 1 à 2 MWh/(stère)m³. Enfin le facteur d'émission du bois, comparable à celui du charbon (mais conventionnellement nul dans l'hypothèse d'une croissance du stock de bois, puisque le carbone émis par combustion est capté par croissance de la masse ligneuse), est typiquement de 90 kgCO₂/GJ soit encore, (comme 1 GJ=0,2778MWh) 324 kgCO₂/MWh ou 324 gCO₂/kWh soit encore 81gCO₂/kg.

gestion du secteur UTCF dans les accords internationaux et européens. La question de la révision du modèle économique de l'investissement forestier, notamment par des signaux prix liés au carbone (débouchant sur le plan financier sur un instrument carbone ou une fiscalité environnementale) est à traiter. Un groupe de travail du comité stratégique de la filière (CSF) bois en a été investi suite à l'élaboration de la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB, cf. *infra*).

2.4. Les cultures, prairies et zones humides

En 2012 les cultures ont contribué aux émissions de GES en France (DOM inclus) à hauteur de 25,6 Mt CO₂ éq tandis que les prairies ont absorbé 11,8 Mt CO₂ éq.²²

La problématique de l'agriculture et de l'élevage est très vaste et ne se limite pas aux questions d'émissions de GES, mais de production et d'indépendance alimentaire, d'aménagement du territoire, de paysage, etc.

En se limitant au prisme des émissions de GES, les leviers d'amélioration sont l'augmentation des matières organiques dans le sol²³ ; le développement de l'agroécologie (cultures intercalaires, bandes enherbées, travail simplifié du sol, rotations plus longues, développement des légumineuses et de l'agriculture biologique²⁴) et l'agroforesterie (arbres dans les parcelles, haies)²⁵, qui ont aussi des bénéfices clairs en termes de biodiversité notamment ; la méthanisation agricole ; la préservation des prairies, l'amélioration de leur productivité, la valorisation de l'herbe et de l'élevage herbager²⁶ ; etc.

2.5. L'artificialisation

L'on a vu que l'utilisation des terres à des fins agricoles se traduit, au titre de l'UTCF, par des émissions significatives. Les changements d'utilisation ont aussi un impact significatif, notamment le déboisement, les conversions de prairies en sols agricoles, et l'artificialisation²⁷ des sols. L'artificialisation des sols provoque un déstockage de carbone et donc des émissions induites.

Le rapport CGEDD de 2013 recommandait de « Recenser les facteurs (y compris les normes réglementaires) qui favorisent actuellement l'artificialisation des sols. »

²² Source : Chiffres clé du climat France et monde – édition 2016, CGDD/SoeS <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2369/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2016.html>

²³ Objectifs indicatifs selon SNBC : « Objectif indicatif : Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates (CIPAN) sur 80 % des cultures de printemps en 2035 »

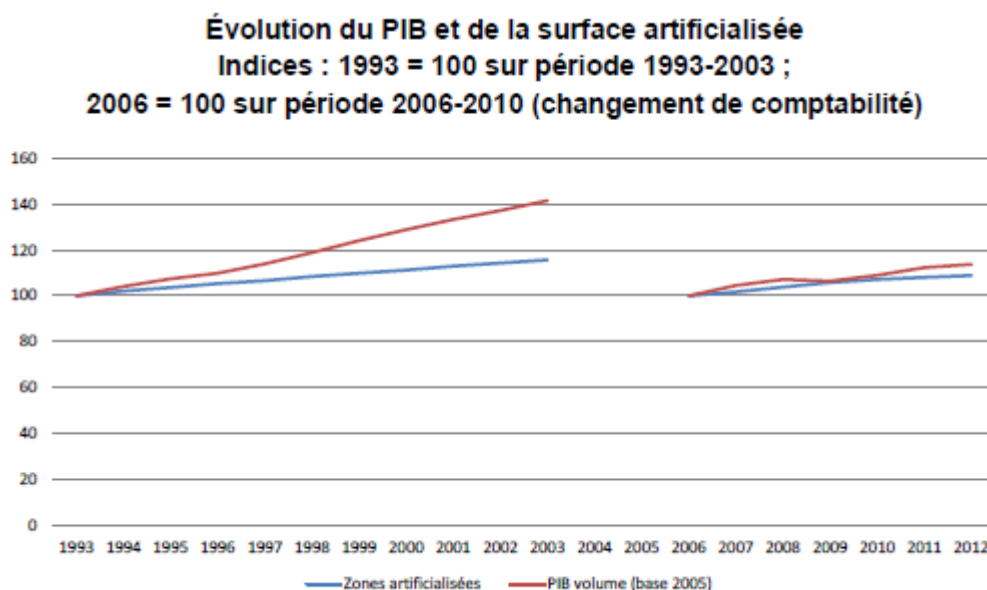
²⁴ Objectifs indicatifs selon SNBC p 91 : 2 M d'hectares de légumineuses en 2035 ; 15 % de la surface agricole utilisée (SAU) Grandes Cultures (et 25 % de la SAU totale) en agriculture biologique en 2035

²⁵ Objectifs indicatifs selon SNBC p 218 : « un total de 700 000 ha de haies et 120 000 ha d'agroforesterie intraparcellaire en 2035 »

²⁶ Objectifs indicatifs selon SNBC : « : limitation de la perte à 490 000 ha de prairies permanentes entre 2010 et 2035 »

²⁷ On entend ici par « artificialisation » des sols, une évolution avec abandon d'une gestion agricole ou forestière pour des usages d'aménagements, d'équipements, de bâtiments ou d'infrastructures (ou, pour imager : mobilisation des techniques de « béton-bitume »).

Un rapport de France Stratégie de 2014 « bâtir un développement responsable »²⁸ observe une tendance à l'accélération de l'artificialisation des terres en France : « Sur la période 1993-2003, en moyenne 60 000 hectares étaient artificialisés par an. Ce rythme semble s'accroître sur la période 2006-2012 en dépassant les 70 000 hectares par an. Cette tendance est due en grande partie à la périurbanisation. ». Selon le même rapport, « l'artificialisation du territoire pose des enjeux importants en matière de soutenabilité. Sur le plan environnemental, elle entraîne une diminution de la quantité et de la qualité des actifs naturels. Elle constitue l'une des causes majeures, peut-être la cause principale, de l'érosion de la biodiversité en France. Elle entraîne la disparition de ressources naturelles, des pollutions par ruissellement et, de manière indirecte, un accroissement des émissions de CO₂ et une détérioration locale de la qualité de l'air. Elle se traduit aussi par la dégradation d'aménités difficilement mesurables comme les paysages naturels qui constituent, pourtant, un précieux héritage que nous ont transmis les générations précédentes, héritage que nous ne pourrions donc léguer dans un état aussi favorable que celui dans lequel nous l'avons reçu. Sur le plan économique, elle entraîne la diminution accélérée du principal facteur de production pour l'agriculture. Sur le plan social, lorsqu'elle prend la forme d'un étalement urbain, elle contribue au délitement du lien social en accroissant les distances entre domicile et travail, entre catégories socioprofessionnelles et entre générations ; elle réduit l'autonomie des individus en accroissant la dépendance à l'automobile et elle augmente la facture énergétique des ménages qui pèse sur leur pouvoir d'achat. Cet indicateur, valable en première approche, offre toutefois une image trop restrictive de la biodiversité et doit être accompagné de plusieurs indicateurs secondaires, tels l'indice d'abondance des populations d'oiseaux communs, l'indicateur Liste rouge UICN, la quantité et la diversité d'ADN dans le sol, l'indice thermique des communautés, ou encore les papillons de prairies. »



Source : France Stratégie, d'après les enquêtes Teruti et Teruti-Lucas (ministère de l'Agriculture)

Source : « bâtir un développement responsable », France stratégie, septembre 2012,

http://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/partieb_soutenable_final_24062014.pdf

²⁸ http://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/partieb_soutenable_final_24062014.pdf

Le rapport 009541-01 de juin 2015 « L'économie circulaire : quelques questions clefs. Rapport complémentaire au rapport "L'économie circulaire : état des lieux et perspectives" »²⁹ aborde brièvement l'artificialisation des sols, la décrit comme une tendance non durable, l'explique d'abord par l'accroissement rapide du nombre de ménages, notamment sous l'effet des phénomènes de décohabitation (+ 38 % de 1980 à 2013, contre + 18 % pour le nombre d'habitants), et par l'accroissement de la part de l'habitat individuel (57 % en 2013) » et fait une recommandation concrète, à savoir l'application du principe du recyclage à la gestion du foncier, par exemple reconversion des friches industrielles.

L'étude « le point sur : l'occupation des sols en France : progression plus modérée de l'artificialisation entre 2006 et 2012 »³⁰ rappelle que le phénomène dominant est l'artificialisation au voisinage des grands centres et le long des grands axes de communication.

Le rapport de 2013 recommandait aussi de « Développer des recherches sur les causes de l'artificialisation des sols (tenant notamment à la dérégulation du marché foncier et au droit de l'urbanisme) qui favorisent l'habitat dispersé et les déplacements motorisés » et de « Développer études et recherches sur les conséquences en termes d'émission de GES des différentes formes d'artificialisation des sols et notamment de l'éclatement urbain ».

Ces constats et appels d'études complémentaires n'empêchent pas les évolutions réglementaires. La loi n°2014-1170 du 13 octobre 2014³¹, dite loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt, renforce par exemple dans son article 25 la préservation des espaces agricoles, naturels et forestiers, « *complétant l'arsenal de protection des terres non urbanisées face à la pression de l'urbanisation. Il donne un rôle accru à la Commission départementale de la consommation des espaces agricoles (CDCEa) qui devient la Commission départementale des espaces naturels, agricoles et forestiers (CDPEnaF), et dont le champ d'intervention est élargi. La préservation des espaces agricoles, naturels et forestiers dans les documents de planification de l'utilisation de l'espace est encouragée.* »³². Mais le sujet reste difficile.

2.6. L'UE et les émissions du secteur Agriculture et UTCF

2.6.1. Politique climatique, agriculture et UTCF

Selon le rapport CGEDD de 2013, aucune mesure concrète à l'échelon européen n'a jusqu'ici eu pour finalité directe la réduction des émissions de GES du secteur agricole, même si plusieurs politiques visant à réduire les pollutions du secteur ont un effet indirect sur les émissions de GES. La feuille de route 2050 de la Commission n'affiche pas de trajectoire ou de valeurs objectifs pour le secteur UTCF (même si des actions relatives à la forêt existent au niveau international, notamment au sein des négociations contre le changement climatique sous l'acronyme REDD+ alias Reduced Emissions from Deforestation and Degradation). Enfin, l'UE, lors des négociations du

²⁹ <http://www.economie.eaufrance.fr/actualite/l%C3%A9conomie-circulaire-quelques-questions-clefs-rapport-du-cgedd> ou <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/154000649/index.shtml>

³⁰ CGDD, SoeS, collection le point sur, n°219, décembre 2015, <http://intra.cgdd.i2/l-occupation-des-sols-en-france-progression-plus-a7916.html>

³¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000029573022&categorieLien=id>

³² http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/160211_dp_laaf.pdf

protocole de Kyoto, s'est engagée à maintenir un puits forestier d'ici 2020 sans tenir compte des récoltes nécessaires à la partie « biomasse » du paquet énergie climat.³³

Le constat est néanmoins que le potentiel d'amélioration du secteur agricole est limité (selon les études de 20 % à 30 %, voire seulement 10 % en 2030 par rapport à 2005), et que l'on peut améliorer la situation comptable en prenant en compte le rôle des puits de carbone comptabilisables dans l'UTCf. Il est aussi admis qu'un État membre de l'UE disposant d'un important secteur agricole est soumis à de plus fortes contraintes pour atteindre ses réductions d'émissions en raison de la difficulté de réduire celles du secteur agricole.³⁴

Le 20 juillet 2016, la Commission européenne a publié une « proposition de règlement 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 pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030 et modifiant le règlement (UE) n° 525/2013 du Parlement européen et du Conseil relatif à un mécanisme pour la surveillance et la déclaration des émissions de gaz à effet de serre et par la déclaration d'autres informations ayant trait au changement climatique »³⁵. Ce règlement a vocation à s'appliquer à partir de 2021, à l'expiration du protocole de Kyoto qui prévoit simplement qu'aucun pays ne doit produire d'émissions supplémentaires du fait de son secteur UTCf (ou UTCF, les termes sont équivalents). Cette contrainte du protocole de Kyoto est ce qu'on appelle la « no debit rule ». Elle n'a guère de justification scientifique, ne tient pas compte de la nécessité d'adapter les forêts au changement climatique, fixe arbitrairement un niveau de référence, et peut d'ailleurs entrer en conflit avec la volonté affichée dans plusieurs documents stratégiques de l'État³⁶, d'exploiter plus avant le potentiel forestier et de considérer les bénéfices carbone du bois hors le seul le puits de carbone forestier à court terme.

Conformément aux règles internationales de la CCNUCC (cf. *supra*), les émissions liées à l'utilisation de la biomasse dans le secteur énergétique sont déclarées et comptabilisées au titre du secteur UTCf.

Les orientations retenues par la Commission sont celles d'un secteur UTCf autonome, qui continuerait d'être utilisé conjointement avec la règle du bilan neutre ou positif, malgré les imperfections ci dessus citées.. Mais un certain degré de compensation serait admis entre le secteur UTCf et les secteurs hors SEQ/ETS (à savoir le secteur du partage de l'effort, dit ESD ou effort sharing decision) Concrètement, au niveau européen global, les crédits liés au secteur UTCf peuvent atteindre annuellement au maximum 1 % des émissions ESD de 2005 ce qui représente sur la période 2021-2030 un total de 280 MtCO₂eq. La France, grand pays agricole, bénéficierait du plus gros crédit en valeur absolue sur la période 2021-2030, soit -58,2 MtCO₂eq, soit encore 1,5 % de ses émissions ESD en 2005.

Les GES pris en compte sont le CO₂, le CH₄ et le N₂O.

³³ Source : « Les usages non alimentaires de la biomasse », septembre 2012, http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Cgpc-CGEOUV00125090&n=1&q=%28%2B%28sujet_word%3Abiomasse+sujet%3A%7Cbiomasse%7C%29%29&fulltext=&depot=&

³⁴ cf. http://ec.europa.eu/clima/news/docs/20160720_impact_assessment_1_en.pdf

³⁵ Voir http://ec.europa.eu/clima/news/articles/news_2016072001_en.htm

³⁶ Programme National forêt Bois, Stratégie Nationale Bas Carbone, contrat stratégique de filière bois

Des absorptions nettes peuvent être transférées d'un État à l'autre pour respecter la règle du bilan neutre ou positif.

Par ailleurs, les absorptions nettes peuvent également être utilisées dans certaines conditions³⁷ pour respecter les niveaux fixés au titre des secteurs non soumis au SEQUE (ETS en anglais).

Les discussions autour de ce projet sont en cours.

2.6.2. Politique agricole commune

Le rapport de 2013 recommandait de « Développer les études et expérimentations technico-économiques explorant le déploiement des réductions des émissions de GES dans le secteur agriculture UTCTF et en déduire les aides nécessaires via la PAC et/ou l'inclusion dans les marchés de carbone ».

Le rapport de 2013 recommandait aussi d' « *Inscrire des objectifs de réduction des émissions de GES dans la négociation 2013 de la PAC et prévoir le soutien aux mesures techniques comme la méthanisation et l'agro-foresterie via l'inclusion de l'agriculture dans les marchés de carbone, ou via une ré-orientation des aides de la PAC en cours de période 2013/2020* ».

Divers scénarios ont été développés comme le scénario Afterres 2050³⁸ publié en 2013, qui implique de fortes ruptures techniques, organisationnelles et comportementales, et réduit les émissions agricoles de GES que d'un facteur 2 (mais aussi la consommation d'eau, et encore plus l'usage de phytosanitaires et d'engrais azotés).

Enfin le programme de développement rural de la PAC 2013 (dit 2e pilier de la PAC) comporte désormais la lutte contre le changement climatique (« Promouvoir l'utilisation efficace des ressources et soutenir la transition vers une économie à faibles émissions de CO₂ et résiliente face au changement climatique, dans les secteurs agricole, alimentaire et forestier ») parmi ses six priorités. La réforme de la PAC 2014-2020³⁹ introduit à partir de 2015 le paiement direct « vert », afin d'introduire des pratiques bénéfiques pour l'environnement et le climat. De plus « le développement rural continuera à jouer un rôle essentiel dans la réalisation des objectifs environnementaux de la PAC et, dans une bien moindre mesure cependant, dans la lutte contre le changement climatique. Le second pilier est clairement axé sur le développement durable, puisqu'au minimum 30 % du budget de chaque programme de développement rural doivent être réservés aux mesures volontaires ayant un impact bénéfique sur l'environnement et le climat. ». Cependant le second pilier n'a pas le pouvoir d'orientation du premier pilier de la PAC (soutien aux marchés et aux revenus des exploitants agricoles, financé par le fonds européen agricole de garantie, et représentant 80 % des dépenses de la PAC).

³⁷ Seuls sont pris en compte le reboisement, et les terres cultivées et prairies. La gestion forestière doit être évaluée avant d'être prise en compte. Ces ajustements sont limités à 1,5 % dans le cas de la France.

³⁸ <http://www.solagro.org/site/393.html>, élaboré par SOLAGRO, INRA, INSERM, ADEME, chambres d'agriculture régionales

³⁹ http://ec.europa.eu/agriculture/cap-post-2013/index_fr.htm

3. Des exercices de prospective concluant en général à un facteur deux au plus pour l'agriculture – exercices antérieurs à 2013

Le secteur agricole fait l'objet de quelques exercices prospectifs, par exemple du ministère chargé de l'agriculture et de l'ADEME à échéance de 2030 et 2050, qui révèlent des scénarios contrastés, mais qui en l'état actuel des connaissances et si on s'en tient à des hypothèses raisonnablement optimistes, ne laissent guère espérer des réductions d'émissions de GES supérieures à un facteur deux (voire 2,5 pour les plus récents), y compris le scénario Afterres 2050⁴⁰, qui implique de fortes ruptures techniques, organisationnelles et comportementales (mais il réduit aussi la consommation d'eau, et encore plus l'usage de phytosanitaires et d'engrais azotés). Ceci est déjà relevé dans le rapport CGEDD de 2013.

Tous les scénarios d'amélioration font appel plus ou moins intensément aux mêmes types de mesures, déjà énumérées dans le rapport CGEDD de 2013, combinées dans des assemblages et des calendriers différents :

- rationalisation de la fertilisation
- réduction des pertes et gaspillages ;
- fin de l'artificialisation des sols ;
- réduction des quantités d'engrais minéraux, production intégrée, agriculture biologique, développement du non labour ;
- agroforesterie et plantation de haies, pratiques stockant du carbone dans le sol et la biomasse : développement des légumineuses fourragères, stockage dans les sols ;
- augmentation des productions végétales protéagineuses et oléagineuses, et suppression concomitante des importations de tourteau de soja, réduction de la fermentation entérique, méthanisation et épandage des digestats comme fertilisants minéraux, meilleure gestion des fumiers ;
- sollicitation de la biomasse agricole et forestière, substitution de biomasse sur les marchés matériau et énergie, stockage de carbone dans la biomasse ;
- évolution des régimes alimentaires par baisse de la ration calorique individuelle et de sa teneur protéines animales (i.e. baisse de la consommation de viande), et donc réduction de l'élevage de bovins...

Les difficultés de réduire de plus d'un facteur deux les émissions du secteur agricole ne sont pas sans incidence sur l'effort demandé aux autres secteurs. Le secteur agricole représentant grosso modo 20 % des émissions, s'il ne réduit que d'un facteur deux ses émissions alors, pour atteindre un facteur quatre global, les autres secteurs doivent en moyenne réduire leurs émissions d'un facteur supérieur à cinq.

Parmi ces études, les documents suivants méritent d'être cités :

⁴⁰ <http://www.solagro.org/site/393.html>, élaboré par SOLAGRO, INRA, INSERM, ADEME, chambres d'agriculture régionales

3.1. Prospective agriculture énergie 2030

L'étude « *Prospective agriculture énergie 2030* »⁴¹ réalisée par le ministère de l'Agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire (centre d'études et de prospective) et le cabinet SOLAGRO en 2009-2010 explore quatre scénarios énergétiques à partir des données physiques de la ferme France en 2006. Il intègre les consommations d'énergies directes (pétrole, gaz), indirectes et la production d'énergies renouvelables. Dans le secteur UTCTF, seules sont considérées les émissions liées aux changements d'affectation des sols entre herbages et grandes cultures. Utilisant des paramètres techniques « à dire d'expert » (prix des énergies, évolution de la PAC, choix institutionnels et politique alimentaire) et sans considération des coûts et des équilibres économiques, ces scénarios, bâtis sur trois principaux enjeux agronomiques (la fertilisation minérale des cultures, les importations de concentré pour l'alimentation animale, et les consommations de carburant agricole) aboutissent à des volumes de production et des bilans énergétiques évoluant fortement, ainsi qu'à des émissions de GES très contrastées :

- « Territorialisation et sobriété face à la crise » : - 35 %
- « Agriculture duale et réalisme énergétique » : 0 %
- « Agriculture-santé sans contrainte énergétique forte » : - 14 %
- « Agriculture écologique et maîtrise de l'énergie » : - 61 %

Les changements d'affectation des sols entre grandes cultures et prairies, et par voie de conséquence les apports en engrais azotés et l'autoconsommation d'énergies renouvelables (méthanisation, biomasse, biocarburants) constituent les éléments d'explication majeurs des différences entre les scénarios. Les pistes de réduction d'émissions sont : la réduction des quantités d'engrais minéraux, le développement du non labour, la plantation de haies, la suppression des importations de tourteaux de soja, le développement des légumineuses fourragères, de la méthanisation et de l'épandage des digestats comme fertilisants minéraux, la substitution du diesel par des huiles végétales pures (n'est donc pas évoquée, par exemple, la réduction de l'élevage bovin même si un élevage plus extensif ou la polyculture-élevage le sont).

Le rapport émet quatre « orientations stratégiques » :

- réduire la consommation d'énergies fossiles et améliorer l'efficacité énergétique des exploitations agricoles ;
- réduire la consommation d'énergies fossiles et améliorer l'efficacité énergétique des territoires et des filières agricoles ;
- produire et consommer des énergies renouvelables et durables ;
- favoriser la recherche-développement et la diffusion de l'innovation sur les enjeux énergétiques en agriculture.

Treize « pistes d'action » déclinent ces objectifs.

⁴¹ <http://agriculture.gouv.fr/rapportfinal-agriculture-energie>

3.2. Agriculture et effet de serre : état des lieux et perspectives – septembre 2010

Cette étude⁴² du Réseau Action Climat, document grand public publié en septembre 2010, récapitule les cycles du carbone et de l'azote liés aux pratiques agricoles, met en évidence leurs liens avec la séquestration dans la biomasse et les émissions de CH₄ et de N₂O. Il rappelle l'internationalisation des marchés agricoles, et la complexité des participations du secteur aux « émissions-absorptions » qui nécessitent des approches systémiques. Si la PAC a fortement évolué depuis 1992 pour prendre en compte la mondialisation puis réduire les impacts environnementaux, l'enjeu climat, et en particulier l'enjeu atténuation très peu présent jusqu'ici), monte en puissance pour l'après 2013, à condition que le cadre budgétaire le permette et que la R et D soit suffisamment avancée pour proposer des approches systémiques intégrables au niveau de l'exploitation. Le rapport appelle à décroiser les négociations agricoles (jusqu'ici cantonnées dans les cycles de l'Organisation mondiale du commerce – OMC) et à les lier aux politiques de lutte contre la déforestation et l'effet de serre. Enfin, il évoque deux pistes pour une politique active de réduction des émissions agricoles : l'inclusion dans le (ou dans un) marché de quotas carbone, ou bien une fiscalité sur le CH₄ et le N₂O (avec des effets prévisibles de déplacement des émissions). Une troisième option peut être d'agir sur la demande alimentaire compte tenu de l'importance des habitudes de consommation sur l'offre agricole.

3.3. Le rapport du conseil d'analyse stratégique « Trajectoires 2020 – 2050, vers une économie sobre en carbone », dit « De Perthuis » - novembre 2011

Le rapport du conseil d'analyse stratégique « Trajectoires 2020 – 2050, vers une économie sobre en carbone »⁴³ du Comité présidé par Christian de Perthuis (novembre 2011) se base, en matière d'agriculture et forêts, sur les travaux de l'INRA.

Ses projections sont, en matière agricole :

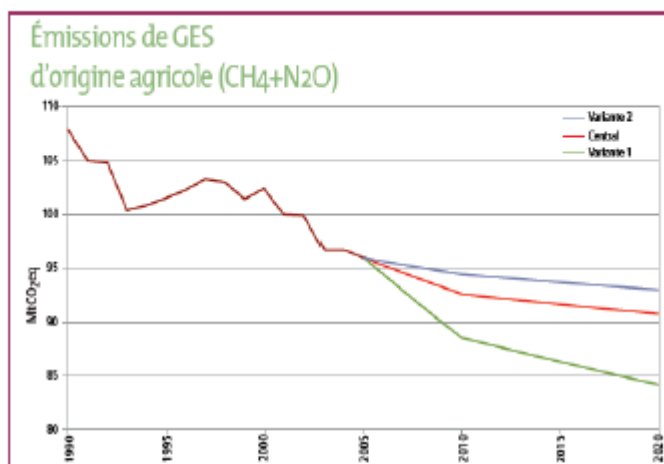
⁴² http://www.rac-f.org/Agriculture-et-gaz-a-effet-de-f.org/IMG/zip/GES_et_agriculture_sept2010-pdf.zip

ou

http://www.rac-f.org/IMG/zip/GES_et_agriculture_sept2010-pdf.zip

⁴³ <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/114000655/index.shtml>

Graphique 20 : Projection des émissions agricoles dans différents scénarios



Source : INRA (2008)

Tableau 17 : Scénarios d'évolution des émissions agricoles (tous gaz à effet de serre) en % d'évolution relativement à 1990

Évolution/1990 (%)	2009	2020	2030	2040	2050
Scénario 1 – Référence	– 11 %	– 15 %	– 27 %	– 39 %	– 50 %
Scénario 2	– 11 %	– 20 %	– 30 %	– 40 %	– 50 %
Scénario 3	– 11 %	– 20 %	– 30 %	– 40 %	– 50 %

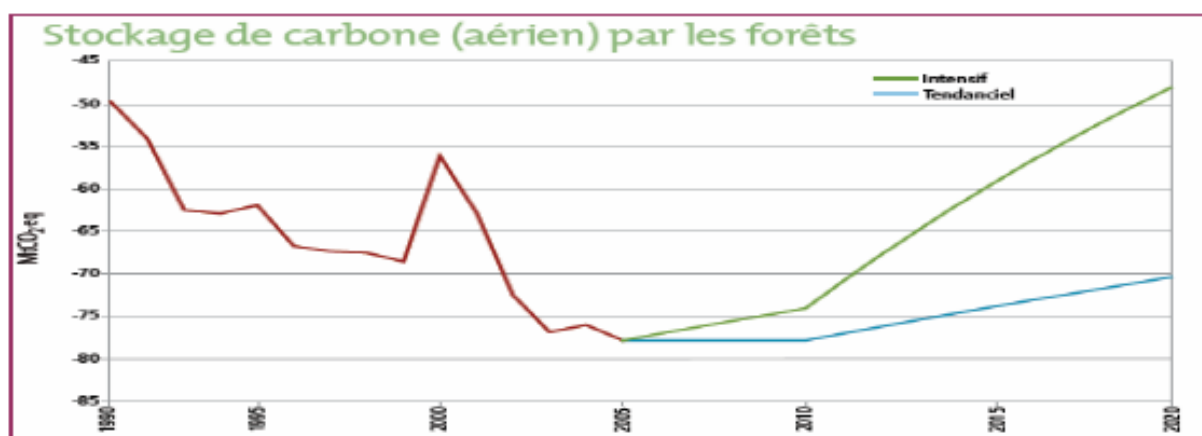
Source : travaux du Comité

Émissions agricoles selon le rapport De Perthuis

À l'horizon 2050, une réduction de 50 % est, selon ces travaux, envisageable moyennant des « incitations puissantes » en matière de pratique agricole et alimentaire ainsi que la levée de barrières technologiques et organisationnelles.

Le secteur UTCF, notamment forestier, est analysé à l'aune d'un scénario tendanciel et d'un scénario d'exploitation forestière intensive, dont le réalisé ultérieur se rapproche. Le rapport note que l'accroissement observé du puits de carbone sur le territoire national métropolitain et outre-mer est essentiellement lié à la gestion forestière d'une forêt en croissance, la déforestation en Guyane compensant l'accroissement en métropole. Il convient de nuancer ce constat du rapport « Trajectoires 2020-2050 », en effet l'accroissement de la forêt est peut-être conjoncturel, car lié à une gestion insuffisante, et correspond en fait à un vieillissement de la forêt.

Graphique 21 : Évolution du puits de carbone dans différents scénarios



(Remarque : la pointe de l'année 2000 résulte des dégâts engendrés par les tempêtes)

Source : données rétrospectives et projections INRA (2008)

Source : Rapport de Perthuis, 2011

Les chiffrages sont relativement peu explicites.

Un scénario d'exploitation intensive réduit le puits de carbone forestier par rapport au tendanciel. Mais le bois récupéré se substitue à d'autres matériaux (énergétiques ou pas) plus énergivores ou carbonés, avec un bilan à long terme positif. Par contre à court terme le bilan n'est pas forcément positif, il convient d'attendre un « temps de retour carbone », comme explicité *infra*⁴⁴.

3.4. Feuille de route européenne pour une économie bas carbone compétitive en 2050 – 2011

La « feuille de route européenne pour une économie bas carbone compétitive en 2050 » (« A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050 »⁴⁵), en date de 2011, obtient des diminutions d'émissions comprises entre - 42 et - 49 %, via l'utilisation efficace des engrais, la méthanisation, une meilleure gestion des fumiers, de meilleurs fourrages, la diversification et la commercialisation de la production au niveau local, une plus grande productivité du bétail, ainsi que la maximisation des bénéfices de l'agriculture extensive.

3.5. Le scénario negaWatt – septembre 2011

Le scénario negaWatt⁴⁶ de 2011, actualisé en 2013, s'appuie sur le scénario Afterres 2050 (voir *infra*) qui applique une démarche de sobriété et d'efficacité sur toutes les étapes de la chaîne agricole, et est centré sur une évolution de l'alimentation visant un meilleur équilibre et une réduction de la surconsommation. Le cheptel est en 2050 divisé par deux ou trois, l'élevage intensif par cinq. Les surfaces sont, pour moitié,

⁴⁴ Cf. avis de l'ADEME de juin 2015, intitulé « forêt et atténuation du changement climatique », http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis_ademe_foret-attenuation-cght-clim_vdef.pdf

⁴⁵ http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/hedegaard/headlines/topics/docs/com_2011_112_en.pdf

⁴⁶ http://www.nega watt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

dévolues à l'agriculture écologique et, pour une autre moitié, à l'agriculture intégrée (ou 45 %, 45 %, avec 10 % résiduels d'agriculture conventionnelle, contre respectivement 2 %, 1 % et 97 % aujourd'hui), avec division par quatre ou cinq des besoins en intrants chimiques, tout en préservant les bons rendements. À l'arrivée, le scénario Afterres parvient à diviser par 2 les émissions agricoles de GES (par trois celles de méthane) et sa consommation d'eau, par 2,5 l'usage des engrais azotés, par trois l'usage des produits phytosanitaires, avec une meilleure adaptation climatique, autonomie alimentaire et qualité alimentaire et nutritionnelle.

3.6. Agriculture et Facteur 4 – juin 2012

« *Agriculture et Facteur 4* »⁴⁷ est une étude réalisée par le ministère chargé de l'agriculture et l'ADEME en juin 2012 avec le cabinet SOLAGRO, Oréade Brèche et ISL. L'exercice prospectif utilise le modèle CLIMAGRI pouvant calculer les flux physiques et suppose des actions à la fois sur l'offre (production et export) et la demande (consommation et importation). Le périmètre des émissions agricoles est identique au périmètre CCNUCC, mais l'occupation du sol agricole et forestier (UTCF) est intégrée. Le scénario de référence 2050 suppose la poursuite des tendances actuelles (démographie à 72 millions d'habitants, artificialisation des terres, consommation de protéines animales) et la réussite des politiques publiques engagées (20 % de la surface agricole utile en agriculture biologique, 20 % en production intégrée, 20 % des déjections méthanisées) ainsi qu'un maintien des échanges. Il réduit les émissions de GES de 9 % (facteur 1,1) par rapport à 1990. Lui sont comparés :

- un scénario ALPHA « intensification écologique » qui s'appuie sur une réduction des pertes et gaspillages, la généralisation de la production intégrée, une sollicitation maximale de la biomasse agricole et forestière, pour aboutir à une réduction des émissions de GES en 2050 de 41 % (facteur 1,7),
- un scénario BETA « alimentation autonomie et sobriété » qui a pour moteur une profonde évolution des régimes alimentaires, par diminution des protéines animales et de la viande bovine, un recours accru à l'agriculture intégrée, biologique labellisée, la substitution de biomasse demandée par les marchés matériau et énergie, pour aboutir à une réduction de 60 % (facteur 2,5),
- un scénario GAMMA « alimentation, efficacité et stockage » qui privilégie la production de biomasse en substitution aux matériaux et énergie fossiles, le stockage dans les sols et la biomasse, et une évolution alimentaire identique à celle du scénario BETA, pour réduire les émissions de 66 % (facteur 3,2).

L'étude fait apparaître la difficulté de réaliser le « facteur 4 » (- 75 %), que ne parvient à atteindre aucun des scénarios étudiés, malgré des modifications majeures des assolements, des régimes alimentaires et des niveaux d'exportation. Un scénario « facteur 4 » dans ce secteur ne pourrait finalement être obtenu que par la combinaison d'hypothèses extrêmement fortes, pouvant induire des ruptures drastiques, ou générer des émissions indirectes par délocalisation de la production. Le simple dépassement du facteur 2 à l'échelle française exigera une évolution des modes de consommation pour atteindre une durabilité plus forte de l'ensemble du système alimentaire. Les efforts à fournir seraient très élevés dans tous les scénarios, provoquant des ruptures marquées pour l'ensemble des acteurs de la société : cultivateurs et éleveurs (disparition du troupeau allaitant dans les scénarios BETA et GAMMA, boisement de terres libérées dans GAMMA), agro-fournisseurs (réduction des intrants), structures d'accompagnement des exploitants agricoles (réduction des

⁴⁷ http://www.jediagnostiquemaferme.com/wp-content/uploads/2015/06/85265_synthese_agriculture_et_facteur_4.pdf

exportations de poudre de lait et de blé), industries agroalimentaires, distribution et consommateurs (modifications profondes de la consommation alimentaire). Ces ruptures doivent cependant être relativisées face aux risques des enjeux climatiques, et surtout remises en perspective des autres enjeux mondiaux, en premier lieu l'enjeu alimentaire, et des profondes évolutions économiques, structurelles et techniques que connaîtra la société française dans les 40 prochaines années.

3.7. Les scénarios ADEME 2030 et 2050 – novembre 2012

L'ADEME a publié le 8 novembre 2012 une synthèse de sa « contribution à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 »⁴⁸. A l'horizon 2050, les économies et l'essor des EnR permettent de réduire les émissions globales de 74 % (facteur 4). En ce qui concerne le secteur agricole, les émissions liées à la combustion passent de 8,7 Mt CO₂ éq en 1990 à 5,5 Mt CO₂ éq en 2030 puis à 3,9 Mt CO₂ éq en 2050 ; les émissions autres (surtout CH₄ et N₂O) passent de 88,2 Mt CO₂ éq en 1990 à 64,1 Mt CO₂ éq en 2030 puis 46,9 Mt CO₂ éq en 2050. Les moyens pour arriver à ces chiffres sont : pour 2030 pas de changement de régime alimentaire mais 20 % de la surface agricole utile (SAU) en agriculture biologique et 10 % en agriculture intégrée, une réduction des intrants (-30 % énergie, -20 % engrais azotés), etc; pour 2050, une évolution des régimes alimentaires, des pratiques de production agricoles plus durables (30 % agriculture biologique, 60 % intégrée, 10 % conventionnelle), avec réduction des intrants chimiques et énergétiques, simplification du travail du sol, développement des cultures associées et intermédiaires, méthanisation, etc.

L'ADEME préconise de développer la capture de carbone dans les sols, et envisage un développement du carbone stocké de 20 % par rapport aux pratiques actuelles en ayant recours aux techniques culturales sans labours, aux engrais verts, à l'enherbement des cultures pérennes (vigne et vergers), à l'implantation de surfaces agro-écologiques (bandes enherbées), à l'agroforesterie, à des pratiques stockantes dans la gestion des prairies. Le gain actuel possible à 2050 est estimé à 2,2 MtCéq/an (8 Mt CO₂ éq).

3.8. Le projet REACCTIF⁴⁹

Ce projet (MAAF, MEDDE, ADEME, INRA) développe une approche destinée à évaluer l'efficacité technique et financière au niveau de l'exploitation des principales mesures évoquées ci-dessus, ce qui constitue effectivement la question principale pour leur déploiement au-delà d'expériences intéressantes, mais limitées. De telles études pourraient utilement être prises en compte pour faire évoluer la PAC, et pour jeter les bases d'un modèle économique de production agricole intégrant le changement climatique, à décliner ensuite par type de production et par contexte...

⁴⁸ <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

⁴⁹ Recherche sur l'atténuation du changement climatique par l'agriculture et la forêt.

4. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios postérieurs à 2013

Depuis le rapport de 2013, les circonstances ont notablement évolué. Les prix du pétrole se sont effondrés en 2014, ce qui rend plus difficile et coûteuse l'action d'atténuation. Les scénarios ont été consolidés et ont alimenté l'élaboration de politiques et stratégies nouvelles, elles-mêmes cohérentes avec les orientations européennes et internationales. Ces évolutions récentes sont exposées chronologiquement *infra*.

Beaucoup de ces scénarios ne donnent, comme les scénarios précédents, qu'une vision partielle des effets sur les émissions de GES limitée au secteur de l'agriculture. Dans certains scénarios, l'effet sur le changement d'utilisation des terres liées à l'agriculture est indiqué. Les effets liés à la forêt ne sont en revanche que très rarement abordés (sauf dans la SNBC). Les études en cours sur le programme national de la forêt et du bois (PNFB) et la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB) apporteront probablement quelques éléments sur cette évolution⁵⁰. Une étude de l'INRA en cours sur les leviers forestiers pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050⁵¹ prend en compte dans son analyse les sécheresses, ravageurs, incendies, tempêtes.

4.1. Afterres 2050 – juillet 2013

Le scénario AFTERRES 2050⁵² « *Un scénario soutenable pour l'agriculture et l'utilisation des terres en France à l'horizon 2050* » (SOLAGRO, INRA, INSERM, ADEME, chambres d'agriculture régionales), a été élaboré en 2011, publié en 2013, et actualisé en 2015, « en préalable la révision de l'ensemble de nos besoins – alimentaires, énergétiques, d'espace,... – afin de les mettre en adéquation avec les potentialités de nos écosystèmes (agricoles, forestiers) ». La démarche est semblable à celle de Négawatt, avec une insistance sur la sobriété, l'efficacité, et la minimisation des impacts environnementaux.

La « version 2015⁵³ est encadrée par deux « variantes », une variante SAB pour « santé, alimentation, biodiversité », et une variante REP pour « résilience et production ». « SAB » priorise la réduction des impacts sur l'environnement, REP augmente notre capacité d'exportation, au détriment d'une légère détérioration des performances environnementales. De fait, Afterres2050 est la version médiane entre ces deux options ».

En matière d'émissions de gaz à effet de serre, à partir d'émissions de 114 Mt CO₂ éq en 2010 et d'un tendanciel à 89 Mt CO₂ éq en 2050, la version 2015 du scénario atteint

⁵⁰ Le PNFB, adopté au printemps 2016, fixe pour 10 ans les orientations en sylviculture et filière bois dans le contexte du changement climatique et pour une meilleure valorisation du bois. Sous deux ans il doit être décliné en programmes régionaux. La SNMB, début 2017, est en consultation.

⁵¹ <http://agriculture.gouv.fr/leviers-forestiers-en-termes-dattenuation-pour-lutter-contre-le-changement-climatique-aux-horizons>; voir aussi *supra*

⁵² <http://www.solagro.org/site/393.html> et <http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Afterres2050-Web.pdf>

⁵³ <http://afterres2050.solagro.org/2016/02/les-chiffres-cles-de-la-trajectoire-afterres2050-version-2015/>

46 Mt CO₂ éq en 2050, le scénario SAB 44 Mt CO₂ éq et le scénario REP 51 Mt CO₂ éq.

En synthèse, « Afterres2050 s'inscrit dans une triple transition :

- Nutritionnelle: avec une assiette plus saine et équilibrée, mais tout aussi goûteuse;
- Agricole: avec des agrosystèmes vivants, productifs et générateurs de bénéfices environnementaux ;
- Énergétique: avec des systèmes de production de bioénergies soutenables.

Parmi les comparaisons qui peuvent être effectuées entre Afterres2050 et la situation actuelle, ou un scénario tendanciel, les points majeurs sont les suivants:

- Une production végétale à un niveau voisin de la production actuelle, mais avec une forte réduction des intrants (azote, énergie, phytosanitaires) et des impacts (pollutions azotées, qualité de l'eau, santé publique);
- Des productions animales profondément modifiées, avec des propositions de diversification des élevages bovins permettant de maintenir les prairies naturelles tout en réduisant fortement les émissions de méthane ;
- Le maintien d'une place importante de la France dans la sécurité alimentaire mondiale, dans le respect des paysanneries des pays du monde;
- Des agrosystèmes reposant sur des infrastructures agro-environnementales nombreuses et diversifiées, sur des sols riches et vivants, donnant la priorité aux facteurs biologiques ;
- Des exploitations diversifiées qui s'engagent dans la production de qualité (bio, AOC, label rouge) et qui répondent aux besoins locaux ;
- Une division par 2 des émissions de gaz à effet de serre ;
- Une sylviculture ambitieuse, capable de produire du bois en quantité tout en augmentant la biodiversité et la valeur écologique des forêts. ».

En tout état de cause, Afterres est un scénario intégré, cohérent, très ambitieux, qui suppose des ruptures de mentalité et d'organisation significatives. Son objectif n'est pas uniquement la mitigation du changement climatique, mais aussi la réduction d'intrants comme l'eau ou les engrais phytosanitaires, l'amélioration de la qualité des produits, la réduction du gaspillage alimentaire, etc.

4.2. Le rapport de l'INRA sur la contribution de l'agriculture à la réduction des émissions de gaz à effet de serre – juillet 2013

Ce rapport de juillet 2013⁵⁴ conclut que « Sous hypothèse d'additivité, le potentiel global d'atténuation annuel des émissions de GES du secteur agricole lié à la mise en place de l'ensemble des actions proposées dans cette étude⁵⁵ serait de 32,3 Mt CO₂ e par an en 2030, hors émissions induites et hors UTCF. Ce potentiel global d'atténuation est réduit de 8 à 18%, selon le mode de calcul, si l'on tient compte des

⁵⁴ <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Etude-Reduction-des-GES-en-agriculture>

interactions entre actions, et se situe alors entre 26,5 et 29,7 Mt CO₂e par an. ». Cette estimation suppose une refonte des méthodes d'inventaire actuelles, qui ne rendent compte que de 30 % de l'atténuation estimée dans le rapport. Pour mémoire les émissions du secteur en 2013 atteignaient 92 Mt CO₂éq. Selon cette étude le potentiel de réduction est donc d'environ un tiers, alors que selon les méthodes d'inventaire actuelles le potentiel de réduction n'est que de 10 %. Ce dernier ordre de grandeur est celui que la SNBC a par la suite demandé au secteur agricole dans ses budgets carbone (80 Mt CO₂éq émises en moyenne annuelle sur la période 2024-2028).

4.3. L'agriculture française face au défi climatique – octobre 2014

Une note d'analyse du centre d'études et prospective⁵⁶ en date d'octobre 2014 compare six des différentes études prospectives sus-mentionnées.

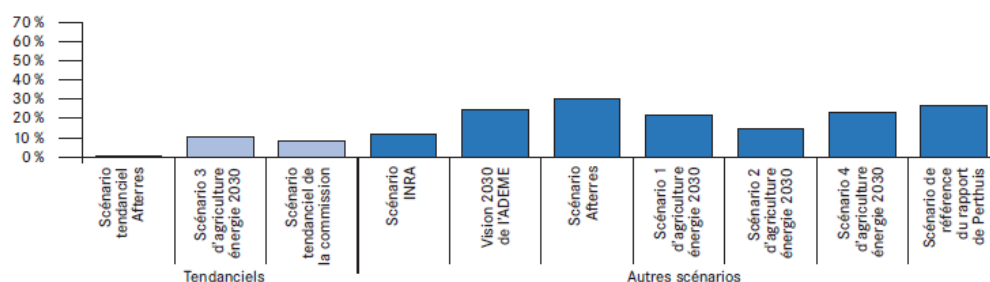
En substance, la note prend acte de la difficulté de l'évaluation des émissions agricoles liées à leur caractère biologique et donc diffus ainsi qu'à des modes de comptabilisation variables en périmètre et méthode (nature des gaz, émissions indirectes ou évitées, stocks et puits de carbone, réévaluation des pouvoirs de réchauffement global) qui peuvent faire varier les résultats du simple au double, mais, heureusement, semblent sans effet sur l'ordre de mérite des scénarios. Pour pallier cette difficulté la note adopte un périmètre identique entre les différentes études pour la comparaison : elle comptabilise les réductions d'émissions directes d'origine agricole, mais pas les émissions indirectes, induites, ou de substitution.

Le résultat de la comparaison est exprimé en réductions d'émissions par rapport à 2005. Le résultat pour 2030 est le suivant :

⁵⁵ Ces actions sont les suivantes : Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N₂O ; Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires, pour réduire les émissions de N₂O ; Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol ; Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans le sol et limiter les émissions de N₂O ; Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale ; Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone ; Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH₄ entérique ; Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et les émissions de N₂O ; Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage ; Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO₂

⁵⁶ <http://agriculture.gouv.fr/lagriculture-francaise-face-au-defi-climatique-quelles-perspectives-dattenuation-de-ses-emissions-de>

Figure 4 - Réductions des émissions de GES agricoles en 2030 pour différents scénarios par rapport à 2005



Source : auteurs

Tableau 1 - Résultats des études pour l'horizon 2030 (« E » pour scénario de type exploratoire et « N » pour normatif)

Scénario	Évolution des GES/2005 ¹⁸	Quelques traits principaux de l'agriculture et de l'alimentation en 2030
Commission européenne : scénario tendanciel (E)	- 8 %*	Les activités diminuent ou stagnent, mises à part les filières porc et lait pour lesquelles la production tend à s'accroître. Le cheptel bovin lait diminue, alors que l'intensification laitière augmente. La fertilisation azotée minérale poursuit sa baisse.
Étude Inra « potentiel d'atténuation » (E)	- 12 %**	Les systèmes de production ne subissent pas de modification majeure et les niveaux de production ne diminuent pas de plus de 10 %, conformément au cahier des charges de l'étude. La vocation exportatrice de la France est maintenue. Le scénario à 2030 consiste en fait au déploiement de leviers techniques et agronomiques visant à réduire les émissions de GES.
Agriculture énergie 2030 : scénario 1, « Territorialisation et sobriété face à la crise » (E)	- 21 %	Les systèmes de production se diversifient et sont relocalisés. Les rendements diminuent (- 20 %) ainsi que les productions végétales. Les surfaces en herbe s'accroissent au détriment des grandes cultures et les protéagineux se développent fortement.
Agriculture énergie 2030 : scénario 2, « Agriculture duale et réalisme énergétique » (E)	- 15 %	Deux modèles d'agriculture coexistent : d'un côté, une « agriculture d'entreprise », de précision et à fort niveau d'intrants, positionnée à l'export (avec développement des OGM pour les biocarburants) ; de l'autre côté, une « agriculture multifonctionnelle », avec diversification des activités et rémunération des services environnementaux.
Agriculture énergie 2030 : scénario 3, « Agriculture-santé sans contrainte énergétique forte » (E)	- 11 %	Les assolements et les rendements restent stables. Le cheptel bovin est réduit (- 10 %) mais les rendements en lait augmentent. Les biocarburants de deuxième génération se développent fortement. L'usage des phytosanitaires est largement réduit et les livraisons d'azote diminuent modérément.
Agriculture énergie 2030 : scénario 4, « Agriculture écologique et maîtrise de l'énergie » (E)	- 23 %	Les productions végétales et animales diminuent légèrement malgré une relative stabilité des rendements et des cheptels. La production de protéagineux se développe et les apports en azote minéral sont très réduits.
Visions ADEME : 2030 (E)	- 24 %	La SAU nécessaire pour l'alimentation humaine directe est stable grâce à une réduction drastique des pertes évitables (- 50 %). L'assiette des Français évolue peu sauf en matière protéique. Les pratiques agroécologiques se développent (10 % de production « intégrée », 20 % de SAU en agriculture biologique, AB). Le cheptel bovin diminue modérément (- 11 %) et les importations de tourteaux sont réduites. Le rythme d'artificialisation des terres est divisé par deux. La consommation d'azote baisse de 22 % et les rendements moyens diminuent.
Aterres : scénario tendanciel (E)	0 %	La SAU est stable, avec une progression limitée des grandes cultures (+ 5 % en surface), et une légère baisse de la surface en herbe (- 3,5 %). Le recours à l'irrigation est important (+ 80 %). L'utilisation des produits phytosanitaires diminue peu (- 13 %) et le bilan azoté ne s'améliore pas. Le cheptel se maintient mais avec une bascule de la viande vers le lait. Les infrastructures agroécologiques progressent un petit peu.
Aterres : scénario soutenable (point de passage à 2030) (N)	- 31 %	L'agriculture conventionnelle recule au profit de l'agriculture biologique, l'agriculture intégrée et l'agroforesterie. Le cheptel bovin commence à être fortement réduit (- 36 % ; - 53 % en allaitants). Les systèmes d'élevage s'extensifient. Les surfaces en grandes cultures augmentent légèrement mais les surfaces fourragères diminuent de 15 %. L'utilisation de produits phytosanitaires et d'azote minéral chute (- 42 % et - 33 %). Les exportations de céréales et de produits laitiers baissent de 14 % et 10 % respectivement, les importations d'huiles et tourteaux (oléoprotéagineux) chutent. Les régimes alimentaires sont modifiés (- 17 % de consommation de protéines animales, - 21 % pour le lait notamment).

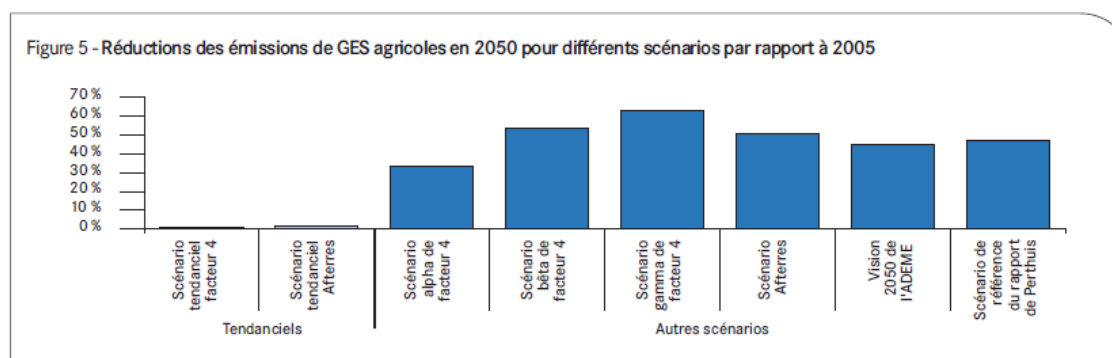
* Hors CO₂

** Émissions selon le mode de calcul CITEPA, inventaire 2012

Source : auteurs, d'après les études analysées

Source : l'agriculture française face au défi climatique : quelles perspectives d'atténuation de ses émissions de gaz à effet de serre, note n°73 d'octobre 2014 du centre d'études et de prospective

Le résultat pour 2050 est le suivant :



Source : auteurs

Tableau 2 - Résultats des études pour l'horizon 2050 (« E » pour scénario de type exploratoire et « N » pour normatif)

Scénario	Évolution des GES/2005 ¹⁹	Quelques traits principaux de l'agriculture et de l'alimentation en 2050
Facteur 4 : scénario tendanciel (E)	- 1 %	Globalement, les productions sont relativement stables par rapport à 2006 : stables en grandes cultures et lait ; en hausse en cultures industrielles et arboriculture ; en baisse de 7 % en viticulture, œufs et prairies naturelles, et de 9 % en bovin viande.
Facteur 4 : scénario alpha « intensification écologique » (N)	- 33 %	L'innovation agronomique et technologique est au cœur de ce scénario : l'agriculture conventionnelle recule au profit de modes de production plus écologiques (production intégrée, agroforesterie, cultures intermédiaires, etc.). La production de grandes cultures baisse de 12 %, celles des prairies de 27 %, celle de lait de 18 % et celle de viande de 26 % (52 % pour les bovins viande). Inversement, la production arboricole est en hausse de 15 %. Les régimes alimentaires évoluent peu et les importations et exportations sont maintenues au niveau actuel. Les pertes et gaspillages sont très réduits. L'exploitation des ressources en biomasse est maximisée.
Facteur 4 : scénario bêta « alimentation, autonomie et sobriété » (N)	- 53 %	Ce scénario est tiré par une profonde évolution des régimes alimentaires. La proportion de protéines animales diminue au profit des protéines végétales. La production intégrée et l'AB deviennent majoritaires en production végétale. L'agroforesterie se développe. En élevage, la production se fait sous signe de qualité et en systèmes herbagers. Suite à ces changements, le cheptel bovin allaitant disparaît. La production de grandes cultures est réduite de 29 %, celle des cultures industrielles et de la viticulture de 15 %. La production de lait chute de 57 % et celle de viande de 48 %. Les pertes et gaspillages diminuent. Les exportations aussi et les importations, elles, sont ajustées au besoin du cheptel. Les terres agricoles libérées par ces changements alimentaires permettent la production de biomasse, en substitution aux ressources fossiles dont le prix a fortement grimpé.
Facteur 4 : scénario gamma « alimentation, efficacité et stockage » (N)	- 62 %	Le stockage de carbone et la production de carbone renouvelable sont les moteurs de ce scénario qui conduit à concilier changements alimentaires et intensification écologique. L'agriculture intégrée, l'agroforesterie et l'AB deviennent majoritaires. Les régimes alimentaires sont fortement modifiés, avec une moindre demande alimentaire et une chute de consommation des produits animaux. Les productions de grandes cultures et de prairies naturelles reculent de 41 %, celles des cultures industrielles et de la viticulture de plus de 20 %. La production de lait et de viande est en baisse de près de 60 % et le cheptel bovin allaitant disparaît quasiment. Les exportations diminuent de 50 %. Les pertes sont drastiquement réduites. Les surfaces libérées sont boisées, stockant du carbone et produisant de la biomasse.
Afterres : scénario tendanciel (E)	- 2 %	La SAU est stable. Les grandes cultures progressent de façon limitée, avec un fort recours à l'irrigation et peu de progrès sur le bilan azoté et l'utilisation des produits phytosanitaires. Le cheptel, surtout laitier, est maintenu au détriment de la viande, et les surfaces en herbe subissent une légère baisse.
Afterres : scénario soutenable (N)	- 51 %	Le scénario s'inscrit dans une « triple transition » : nutritionnelle (consommation raisonnée, sobriété), agricole (transition agroécologique) et énergétique (moindre consommation d'énergie fossile et production d'énergie biosourcée). L'agriculture conventionnelle disparaît progressivement au profit de l'AB, l'agriculture intégrée et l'agroforesterie. Le cheptel bovin est massivement réduit (- 70 % ; - 85 % en allaitants), de même que les cheptels porcins et de volailles. Les systèmes d'élevage s'extensifient. Les surfaces en grandes cultures diminuent peu mais les surfaces fourragères chutent de 40 %. Les coefficients de rendements équivalents par unité de surface s'accroissent. Les exportations de céréales et de produits laitiers chutent de 28 % et 20 % respectivement, ainsi que les importations d'huiles, tourteaux et oléoprotéagineux. Les régimes alimentaires sont fortement modifiés avec une division par 2 de la consommation de viande et par 2,5 de celle de lait. Les pertes et surconsommations sont fortement réduites.
Vision ADEME : 2050 (N)	- 45 %	En 2050, les régimes alimentaires évoluent vers une réduction des surconsommations et un rééquilibrage entre protéines animales et végétales. La consommation de produits animaux (lait, viande bovine) diminue. La réduction des pertes évitables atteint un plafond. Les pratiques agricoles évoluent vers des systèmes agroécologiques, en production intégrée ou en agriculture biologique. Les pratiques telles que la simplification du travail du sol, l'agroforesterie ou les cultures associées se généralisent. Les élevages bovins misent sur l'herbe et l'autonomie protéique. L'utilisation des engrais azotés est réduite de 37 %, les besoins en irrigation s'accroissent de 30 % (moins que les besoins tendanciels attendus), et l'artificialisation des terres s'arrête en 2030. Les importations de tourteaux chutent ; la capacité exportatrice de la France, en équivalent énergie, est maintenue.
Étude de Perthuis : scénario de référence (N)	- 47 %	La R&D et la diffusion de méthodes « écologiquement intensives » sont soutenues par les pouvoirs publics. L'image future de l'agriculture demeure néanmoins très peu précise dans cette étude.

Source : auteurs, d'après les études analysées

19. Dans ce tableau, les valeurs de réduction ont été calculées par le CEP, sur la base des résultats disponibles dans les différentes études.

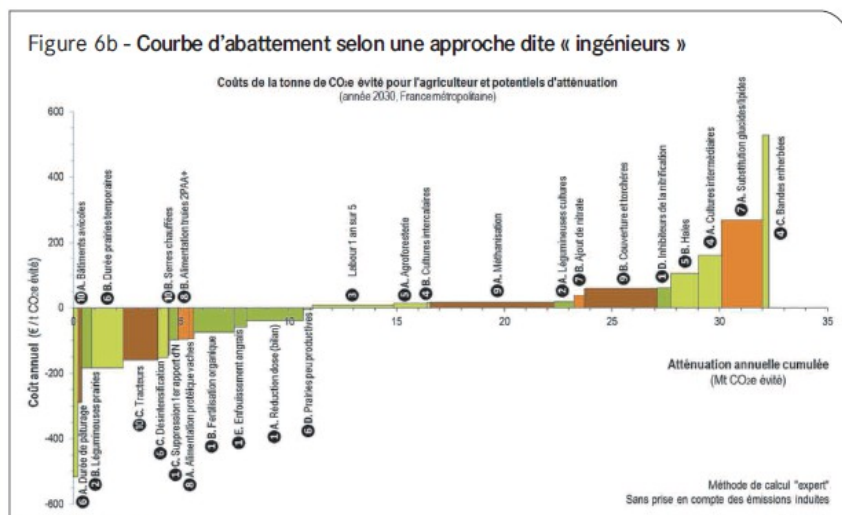
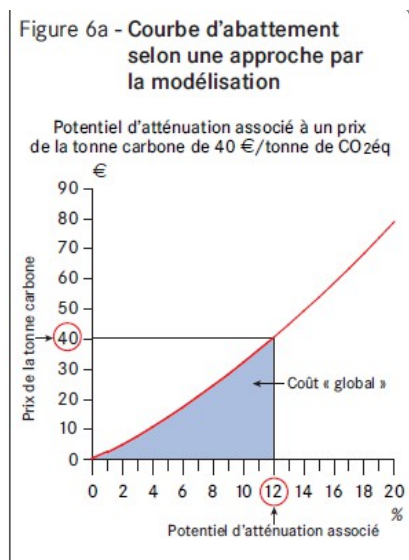
Source : l'agriculture française face au défi climatique : quelles perspectives d'atténuation de ses émissions de gaz à effet de serre, note n°73 d'octobre 2014 du centre d'études et de prospective

« De ce travail ressortent les enseignements suivants: les hiérarchies dans les émissions des scénarios (du plus au moins émetteur) sont assez robustes aux changements de périmètre. Quand les émissions directes d'un scénario donné sont inférieures à celles d'un autre scénario, alors il en est de même si l'on inclut les émissions indirectes (cf. supra) et/ou les variations de stocks de carbone agricoles et forestiers. La réduction d'émissions (en %) est même, en général, supérieure si l'on considère ces périmètres élargis: on pourrait parler « d'effet synergique » dans le sens où l'atténuation des émissions directes « potentialise » celle des émissions indirectes et le stockage de carbone. La diminution des apports azotés et des cheptels, qui accompagne de nombreux scénarios, conduit en effet à une moindre consommation d'intrants, donc d'émissions indirectes, liées à leur fabrication. De la même façon, dans les scénarios les plus ambitieux (bêta, gamma et Afterres), où la demande alimentaire est réduite ainsi que la pression d'artificialisation, certaines surfaces agricoles sont converties en surfaces forestières, ce qui permet de stocker du carbone et de réduire d'autant plus les émissions.

Enfin, quel que soit le périmètre considéré, on n'obtient ici aucun scénario à « émissions négatives », avec stockage net de carbone: pour espérer y parvenir, il faudrait pouvoir tenir compte également des émissions économisées du fait des substitutions avec les autres secteurs, ce que ne permet pas l'outil Climagri®. »

Les scénarios tendanciels ne permettent pas plus de 10 % de réduction des émissions de GES. On peut aller à 10-20 % à l'horizon 2030 en s'appuyant sur des leviers techniques (efficacité, réduction des productions, substitution, stockage...). Pour aller au-delà, des ruptures sont nécessaires et aboutissent à des réductions en général entre 20 % et 35 % à l'horizon 2030, et entre 30 et 60 % à l'horizon 2050. Aucun scénario ne permet de dépasser 35 % en 2030 ni d'atteindre le facteur 4 pour 2050.

Des éléments sur les coûts des actions d'atténuation et d'efficacité économique sont aussi présentés :



Source : l'agriculture française face au défi climatique : quelles perspectives d'atténuation de ses émissions de gaz à effet de serre, note n°73 d'octobre 2014 du centre d'études et de prospective

Finalement la note insiste sur « l'importance d'accompagner le secteur agricole vers une réduction des émissions, la production d'énergies renouvelables (dont les

émissions substituées sont actuellement comptabilisées dans les autres secteurs) et un stockage accru de carbone. Un autre défi majeur sera de concilier atténuation et adaptation de l'agriculture et de ses filières à de nouvelles conditions climatiques, notamment en favorisant la conception de systèmes de production plus résilients aux aléas. Autant de défis qui sont inscrits à l'agenda politique national, européen et mondial. »

4.4. Les contributions possibles de l'agriculture et de la forêt à la lutte contre le changement climatique – octobre 2014⁵⁷

Le rapport du Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux (CGAAER) vise à faire ressortir la contribution possible de l'agriculture et de la forêt à la réduction des émissions de gaz à effet de serre tout en prenant en compte la nécessité de pouvoir répondre aux besoins alimentaires des populations.

Le rapport insiste sur le rôle de pompe à carbone du monde végétal et se félicite d'une évolution du GIEC qui a adopté dans son dernier rapport le cadre global de l'utilisation des terres, ses changements, l'agriculture et la forêt (UTCAF) pour analyser les phénomènes correspondants, regroupant ainsi UTCF et agriculture. Ce regroupement n'est d'ailleurs pas toujours approuvé, les problématiques de l'agriculture et de la forêt étant différentes.

Les voies de progrès retenues en priorité par le rapport sont :

- La préservation des terres agricoles et des prairies ;
- Les changements de pratique et de systèmes de culture ou d'élevage (e.g. agro-écologie) ;
- La mobilisation de l'accroissement forestier, le reboisement accru et l'agroforesterie ;
- Le développement des biofilieres avec leurs capacités de stockage et de substitution ;
- La réduction des pertes et des gaspillages alimentaires.

Les gains possibles estimés à l'échéance 2030 sont de 10 à 15 Mt CO₂ éq/an pour l'agro-écologie, de 8 à 10 Mt CO₂ éq/an pour un meilleur contrôle de l'artificialisation et du retournement des prairies, de 5 Mt CO₂ éq/an pour l'amélioration de la capacité productive de la forêt et du stockage du carbone sous forme de produit bois, de 40 Mt CO₂ éq pour le développement des filières de la bio-économie (comptabilisés en dehors du secteur UTCAF) et de 10 Mt CO₂ éq liés à une limitation du gaspillage alimentaire.

4.5. La loi de transition énergétique pour la croissance verte – août 2015

La LTECV⁵⁸ du 17 août 2015 « tient compte de la spécificité du secteur agricole, veille à cibler le plan d'action sur les mesures les plus efficaces, en tenant compte du faible

⁵⁷ Voir

http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents/version_definitive_du_rapport_14056_cle0f5235.pdf

⁵⁸ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-3.pdf

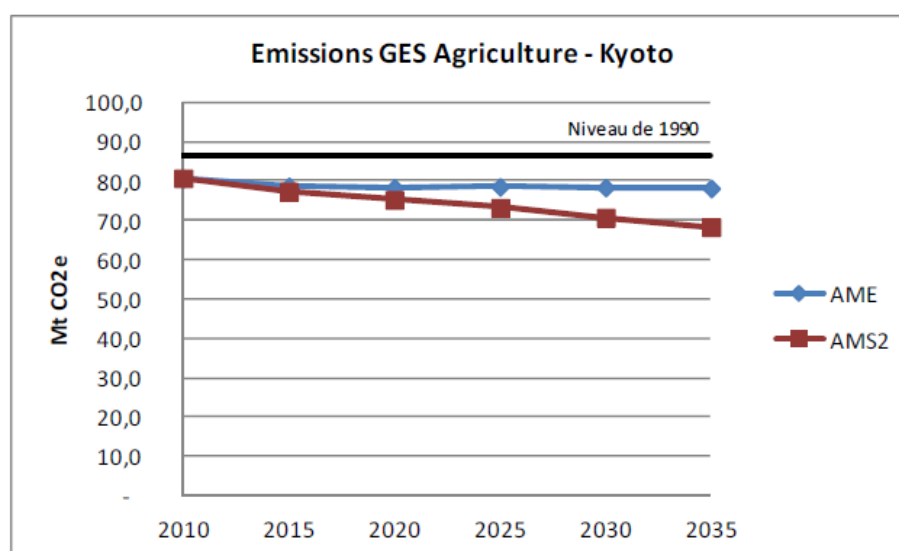
potentiel d'atténuation de certains secteurs, notamment des émissions de méthane entérique naturellement produites par l'élevage des ruminants ». Elle est assez peu diserte sur le secteur agricole.

4.6. Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035

Le rapport « Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 »⁵⁹ commandité par la DGEC et remis en septembre 2015 « fournit une synthèse des résultats de l'exercice de modélisation pour la construction des scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air à l'horizon 2035 ». Deux scénarios principaux ont été construits et analysés: un scénario « AME » « avec mesures existantes » au 1er janvier 2014, et un scénario « avec mesures supplémentaires », appelé « AMS2 » incluant la mise en œuvre effective de toutes les mesures prévues dans l'AME, ainsi que celles adoptées ou annoncées après le 1er janvier 2014, dont en particulier les mesures et, surtout, les objectifs prévus par la LTECV (-40% des émissions de GES en 2030 par rapport à 1990, 32% la part des énergies renouvelables en 2030, etc.

Pour l'agriculture on a :

Tableau 20 : Emissions de GES au périmètre Kyoto du CRF 3



Emissions de GES de l'agriculture - Kyoto (Mt CO2e)								
	1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030 / 1990 (%)
AME	86,4	80,8	78,8	78,4	78,6	78,5	78,2	-9%
AMS2	86,4	80,8	77,4	75,3	73,4	70,8	68,4	-18%

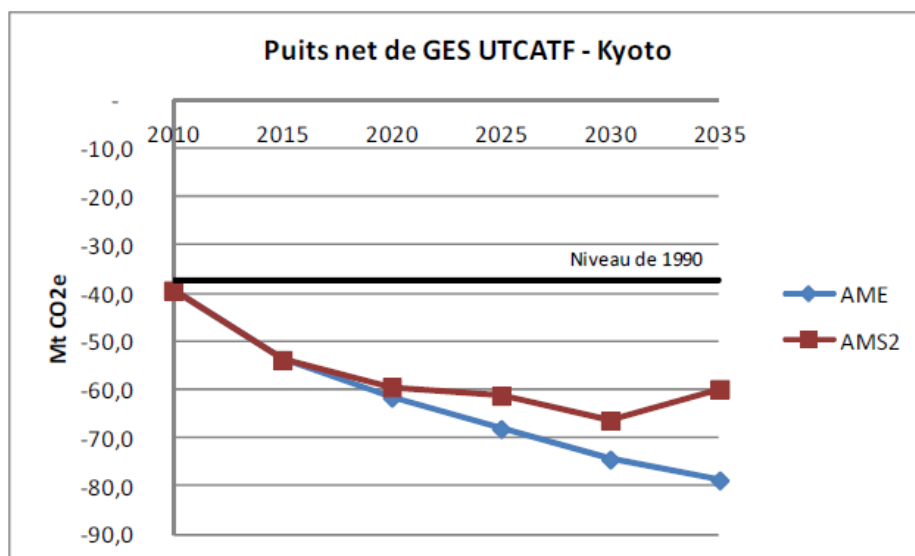
Source : CITEPA

Émissions de GES de l'agriculture selon les Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035. Les consommations énergétiques de l'agriculture ne sont pas prises en compte.

Et pour l'UTCf on a :

⁵⁹ http://www.themavision.fr/upload/docs/application/pdf/2016-03/synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne_2016-03-17_17-50-30_662.pdf

Tableau 21 : Puits net de GES UTCATF au périmètre Kyoto



MtCO2e		Emissions de GES de l'agriculture- Kyoto						
MtCO2	1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030/1990 (%)
AME	-37.7	-39.4	-53.8	-61.6	-68.1	-74.4	-78.7	98%
AMS2	-37.7	-39.4	-53.8	-59.4	-61.2	-66.3	-59.8	77%

Source : CITEPA

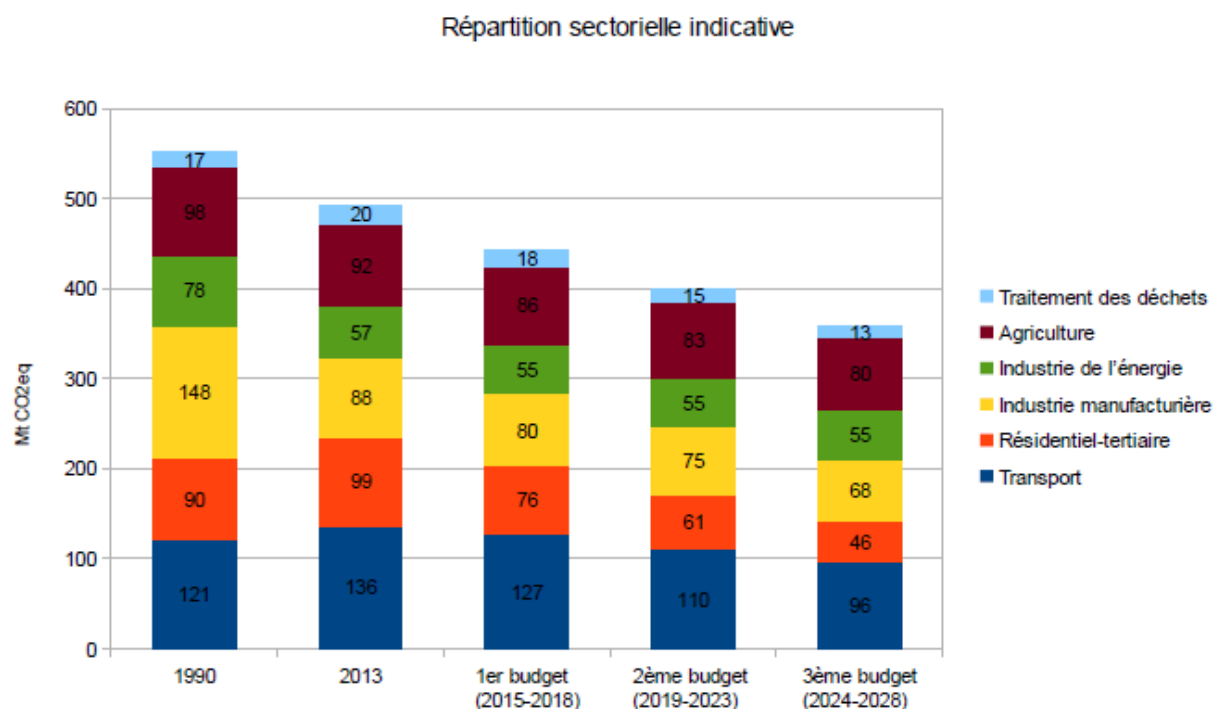
Émissions de GES du secteur UTCATF selon les Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035

4.7. La stratégie nationale bas carbone – novembre 2015

4.7.1. Les budgets d'émission de la SNBC

La SNBC⁶⁰ de novembre 2015 précise les choses et décline les orientations de la LTECV en trois périodes quinquennales assorties de cibles d'émissions moyennes annuelles de GES, hors UTCF.

⁶⁰ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf



Source : SNBC

4.7.2. Les émissions agricoles dans la SNBC

Le secteur de l'agriculture, émetteur de 98 Mt CO₂ éq en 1990 et 92 en 2013, se voit assigner une cible de 86 Mt CO₂ éq annuelles sur la période 2015-2018, 83 sur 2019-2023 et 80 sur 2024-2028, soit un rythme de décroissance faible.

L'argumentaire pour une agriculture bas-carbone est le suivant : « *L'agriculture représente environ 19% des émissions de gaz à effet de serre de la France comptabilisées dans les budgets carbone, auxquels s'ajoutent des émissions associées aux changements d'usage des sols agricoles.*

Par rapport à 2013, l'objectif dans le scénario de référence est de parvenir à baisser ses émissions de 12 % à l'horizon du troisième budget carbone par rapport à 2013, et d'un facteur deux à l'horizon 2050 par rapport à 1990.

Les orientations prises pour le secteur agricole doivent lui permettre de s'inscrire dans l'effort national de réduction de GES, tout en préservant sa compétitivité et en offrant des opportunités de croissance verte et de création d'emplois, car elles permettent de :

- *garantir la sécurité alimentaire et soutenir la bioéconomie en assurant la fourniture de produits non alimentaires ;*
- *protéger l'environnement et les ressources naturelles (l'eau, la biodiversité, les sols, l'air, ...), préserver la santé publique, préserver les paysages et les dynamiques sociales.*

Cinq facteurs jouent un rôle important pour atteindre les objectifs :

- les systèmes et pratiques de culture et d'élevage, qui, pour une même mise à disposition de produits agricoles peuvent émettre plus ou moins de GES ;
- l'aménagement des territoires ruraux et l'usage des terres ;
- l'efficacité de l'ensemble de la chaîne de mise à disposition de la nourriture au consommateur final, qui permet une réduction du gaspillage et des émissions indirectes ;
- la demande alimentaire (composition des régimes alimentaires, quantités, origine des produits, ...) qui influence la composition de la production agricole ;
- les techniques d'adaptation au changement climatique qui permettent de maintenir ou d'améliorer les systèmes de production.

Les objectifs principaux consistent à diminuer les émissions directes du secteur agricole (N₂O, CH₄), à stocker ou préserver le carbone dans les sols et la biomasse, et à substituer des émissions d'origine fossile par une valorisation (pour la production de matériaux biosourcés ou d'énergie) de la biomasse. »

Sur la « Mise en œuvre renforcée du projet agro-écologique », L'atteinte de ces objectifs suppose la mise en œuvre renforcée du projet agro-écologique, et notamment :

- l'optimisation de l'usage des intrants (engrais, alimentation animale,...) et la recherche d'autonomie avec des ressources locales (substitution des engrais minéraux par des engrais organiques, autonomie protéique et optimisation des rations animales,...) ;
- la diversification des assolements et le développement des légumineuses ;
- le maintien des prairies permanentes et le développement de l'agroforesterie, des haies, et des autres infrastructures agro-écologiques ;
- la couverture des sols et l'augmentation du taux de matière organique dans les sols ;
- le développement des productions à forte valeur ajoutée ;
- la performance énergétique des bâtiments et équipements agricoles ainsi qu'un développement important de la méthanisation agricole.

En matière de « forêt-bois-biomasse », la SNBC indique que « *Aujourd'hui, quatre leviers permettent de compenser de l'ordre de 15 à 20 % des émissions nationales :*

- 1. la substitution des matériaux énergivores par des produits bio-sourcés ;*
- 2. la valorisation énergétique de produits bio-sourcés ou déchets issus de ces produits qui se substituent aux combustibles fossiles ;*
- 3. le stockage de carbone dans les produits bois et ceux à base de bois ;*
- 4. la séquestration de carbone dans l'écosystème forestier.*

Il s'agit de promouvoir une gestion multifonctionnelle de la forêt, de renforcer notablement la valeur ajoutée des usages tout en accroissant le volume de bois

prélevé annuellement et d'inscrire les espaces de déprise agricole dans une dynamique de gestion durable. Il convient aussi de stimuler les synergies et usages en cascade avec par exemple la valorisation des co-produits et des déchets des filières bio-sourcées, leur recyclage et (in fine) leur usage à des fins de production énergétique. Plus globalement, la gestion de tous les usages de biomasse doit être renforcée et optimisée. Une haute qualité environnementale doit être recherchée dans tous les projets de dynamisation de la mobilisation de la ressource, en tenant tout particulièrement compte des enjeux de biodiversité.

La mise en œuvre de ces objectifs passe par :

- le regroupement de la petite propriété forestière ou a minima de sa gestion, assurant son renouvellement régulier (remise en gestion des friches, conversion de taillis, et notamment des taillis pauvres, avec si besoin modification des essences...) ;*
- un cadre fiscal incitant à une gestion dynamique et durable de la ressource ;⁶¹*
- un usage efficient des ressources bio-sourcées dans tous les secteurs de l'économie (l'industrie, la construction, l'ameublement, l'emballage, les filières énergétiques, etc.);*
- un suivi attentif de la durabilité et notamment des impacts sur les sols et sur la biodiversité ;*
- un suivi renforcé et partagé des flux de matière et des données économiques. »*

En résumé, dans la SNBC c'est le facteur 2 qui est visé pour 2050 dans le secteur agricole.

4.7.3. Le secteur UTCF dans la SNBC

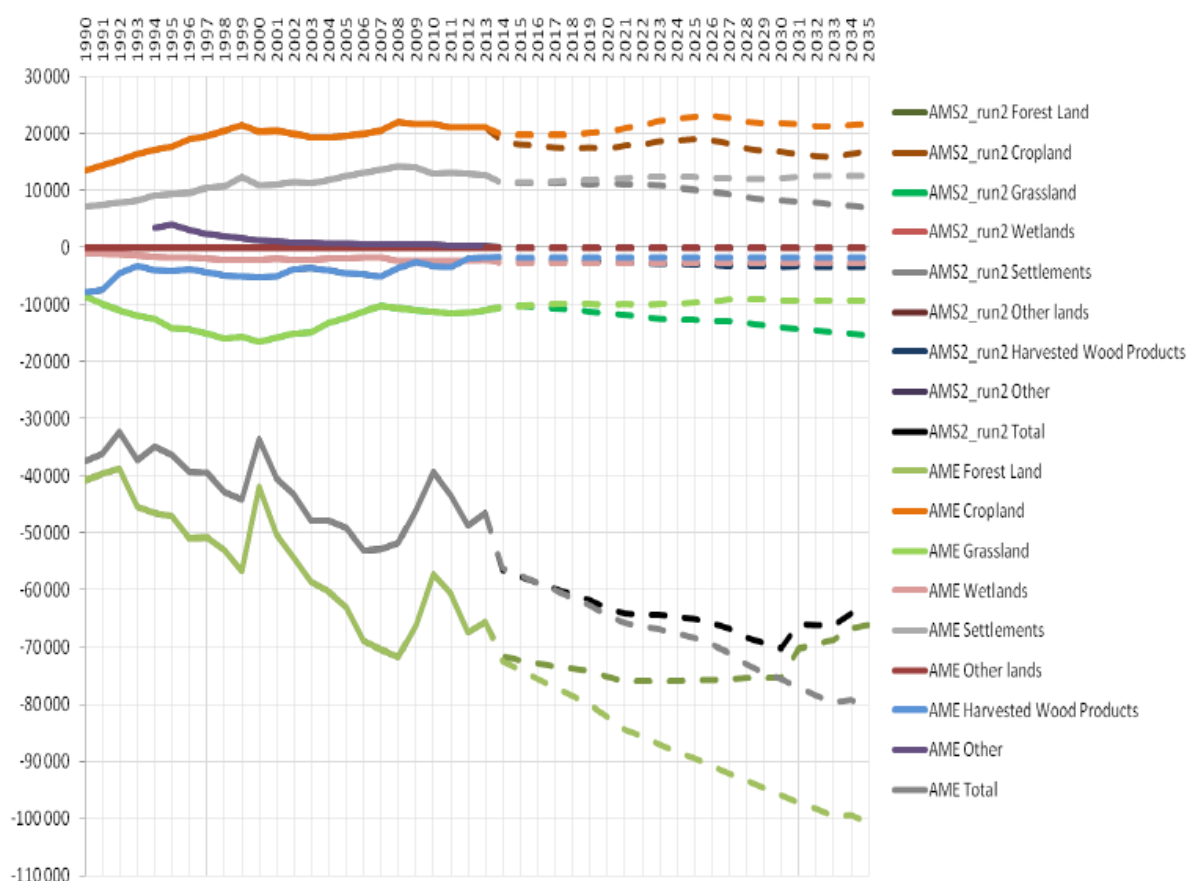
La SNBC comporte une annexe, qui précise les conséquences des politiques énergétiques bas carbone sur les émissions liées à l'utilisation des terres et à leur changement d'affectation.

La réalisation des objectifs nationaux en matière de développement des énergies renouvelables suppose une hausse massive des prélèvements de bois, se traduisant par une stabilisation, voire une diminution du puits attaché à la gestion forestière, qui passe de 64 Mt CO₂ éq en 2014 à 54 Mt CO₂ éq en 2035, alors que sans cette politique de mobilisation du bois il aurait atteint 85 MteCO₂.

Les mesures concernant les sols agricoles (préservation des prairies permanentes, développement de l'agroforesterie, etc.) inversent en revanche la tendance et permettent de passer d'une source de 9,9 Mt CO₂ éq aujourd'hui à 3,3 Mt CO₂ éq en 2035.

Le graphe ci-dessous illustre ces évolutions.

⁶¹ Ndlr : on en est loin



Source : SNBC, annexe 7, Evolution projetées des émissions et absorptions du secteur UTCF selon les scénarios avec mesures existantes (AME) et avec mesures supplémentaires (AMS2)

4.8. Analyse comparative par l'ADEME de scénarios agricoles, décembre 2015

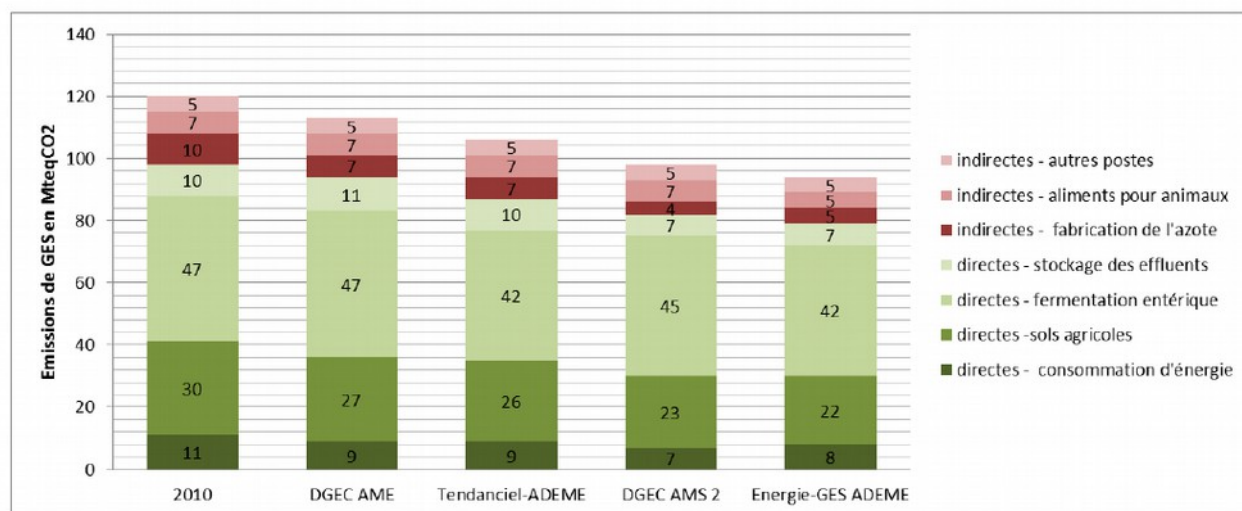
L'« analyse comparative de scénarios de lutte contre le changement climatique pour l'agriculture à l'horizon 2035 - hypothèses, évaluation et enseignements »⁶², produite par l'ADEME en décembre 2015, exploite les scénarios à moyen terme (2035) de l'ADEME d'une part, de la DGEC et du MAAF d'autre part.

« Au bilan, ces scénarios mettent en évidence la possibilité physique d'atteindre une réduction des émissions de GES de 20% environ en 2035 pour l'agriculture et la forêt, en utilisant l'ensemble des leviers disponibles. Le levier stockage de carbone dans les sols et la biomasse est significatif mais doit être considéré à une échelle plus globale intégrant les forêts et l'artificialisation des sols. Le développement des énergies renouvelables basées sur la biomasse permet de contribuer à l'atténuation des émissions de GES grâce à la substitution de ressources fossiles, tous secteurs d'activités confondus, et elle est une source de diversification des revenus pour les agriculteurs. La substitution ne permet cependant qu'une réduction limitée des émissions du secteur, comme les consommations énergétiques ne représentent que 10% des émissions agricoles. ».

⁶² http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_vision_2035_vf.pdf

L'analyse de l'ADEME illustre les conséquences des scénarios sur les émissions de GES du secteur de l'agriculture et de la partie UTCF liée à l'agriculture. Elle ne donne pas une vision globale pour le secteur UTCF, en ne traitant pas ce qui est lié à la sylviculture.

Emissions de gaz à effet de serre (GES)



– STOCKS ET DENSITE DE CARBONE ORGANIQUE DANS LES TRENTE PREMIERS CENTIMETRES DES SOLS AGRICOLES EN 2010 ET POUR LES DIFFERENTS SCENARIOS (ESTIMATION CLIMAGRI®)

	2010	Tendanciel		Energie-GES	
		DGEC AME	ADEME	DGEC AMS 2	ADEME
Stocks (GtC)	1,77	1,62	1,63	1,70	1,72
Densité (tC/ha)	64,5	63,9	63,9	65,7	65,8

Source : Analyse comparative Ademe de scénarios de lutte contre le changement climatique pour l'agriculture à l'horizon 2035

4.9. Le programme national de la forêt et du bois – mars 2016

Le Programme national de la forêt et du bois (PNFB) est une application directe de la Loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt du 13 octobre 2014. Le décret n° 2015-666 du 10 juin 2015⁶³ en détaille les contours : « *En matière environnementale, le programme national de la forêt et du bois concourt à la mise en œuvre des objectifs de la stratégie nationale pour la biodiversité et du plan national d'adaptation au changement climatique.*

« *Sur la base d'un état des lieux concerté entre les différents acteurs, il identifie les enjeux de la politique forestière notamment en termes de gestion forestière durable, de valorisation des forêts dans les territoires, d'économie de la filière forêt-bois, de recherche, de développement et d'innovation, de coopérations européennes et internationales.*

« *Le programme national de la forêt et du bois planifie les actions stratégiques à l'échelle nationale. Il comporte des recommandations sur les outils et les moyens à*

⁶³ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000030717434&dateTexte=&categorieLien=id>

mobiliser en vue de la réalisation des objectifs mentionnés à l'article L. 121-2-2. Il fixe les actions prioritaires et hiérarchisées ainsi que les efforts d'amélioration des connaissances à mettre en œuvre pour y parvenir. Il fixe également les conditions de suivi et d'évaluation des actions stratégiques.

« Le programme national de la forêt et du bois est compatible avec les orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques prévues à l'article L. 371-2 du code de l'environnement. Il précise les mesures permettant d'éviter, de réduire et, le cas échéant, de compenser les atteintes aux continuités écologiques que sa mise en œuvre est susceptible d'entraîner. ».

Le projet de PNFB⁶⁴ a été présenté au conseil national de la forêt et du bois le 8 mars 2016. La disponibilité technico-économique supplémentaire en dix ans (moyenne annuelle sur la période 2021-2025 par rapport à la moyenne annuelle de la récolte courante 2011-2015) dans le scénario de gestion dynamique progressif est estimée à +8,8 Mm³ pour le BO-P (bois d'oeuvre potentiel) et le BIBE-P (bois industrie et bois énergie potentiel). La valeur correspondante pour les menus bois (MB), dont la majeure partie n'est actuellement pas récoltée, est estimée à +6,2 Mm³ dont moitié seulement serait récoltée. L'objectif national de mobilisation retenu dans le PNFB est donc d'atteindre en 2026 une récolte de bois commercialisée en augmentation de 12Mm³, soit 65 % de l'accroissement biologique naturel, au lieu de 50 % actuellement. Le projet de PNFB ne comporte pas d'éclairage sur les conséquences à en attendre en matière d'émission de GES, ni sur les moyens que l'on se donne pour cela. Il serait souhaitable qu'il comporte cet éclairage sur les conséquences et les moyens.

4.10. Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse

Des travaux ont débuté le 3 mai 2016 pour l'élaboration d'une stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB⁶⁵) et de schémas régionaux biomasse (SRB), prévus par la LTECV. Il s'agit en substance de « permettre le développement de l'énergie biomasse et l'approvisionnement des installations de production d'énergie dans les meilleures conditions économiques et environnementales », en tenant compte des interactions avec l'approvisionnement en bois et l'utilisation du bois matériau, vertueuse du point de vue des émissions de GES, (cf. avis de l'ADEME *supra* qui fait état en analyse de cycle de vie d'un effet de réduction double à celui de la simple valorisation thermique), en cohérence avec la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), la stratégie nationale bas carbone (SNBC), ou encore les documents portant sur la filière forêt-bois (Programmes national et régionaux de la forêt et du bois) et la filière déchets (Plan national et programmes régionaux de prévention et de gestion des déchets), voire aussi l'articulation avec les usages alimentaires.

Selon les termes du projet de décret, « *La stratégie nationale de mobilisation de la biomasse définit des orientations et recommandations, et planifie des actions nationales concernant les filières de production et de valorisation de la biomasse susceptible d'avoir un usage énergétique, afin de développer les ressources de biomasse, d'augmenter leur mobilisation, notamment pour l'approvisionnement des installations de production d'énergie, et d'améliorer la valorisation qui en est faite, dans le respect de l'environnement, en permettant une bonne articulation des usages, et en contribuant à l'atténuation du changement climatique. Elle détermine également les efforts d'amélioration des connaissances à mettre en œuvre concernant la biomasse*

⁶⁴ http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/160307_projet_plannational_foretbois.pdf

⁶⁵ <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-decret-relatif-a-la-strategie-nationale-a1320.html>

mobilisable et le développement de ses usages non alimentaires. Elle fixe par ailleurs les conditions de suivi et d'évaluation des orientations et recommandations envisagées. ».

5. Problèmes et solutions

5.1. La difficile mesure des émissions liées à l'agriculture et l'UTCf

Le secteur est particulièrement complexe : il implique plusieurs GES différents (CO_2 , CH_4 , N_2O ...), et est à la fois émetteur et absorbeur de CO_2 . Régi par des phénomènes naturels difficiles à appréhender, il fait l'objet de difficultés sérieuses de mesure :

5.1.1. Des incertitudes scientifiques

Une première difficulté porte sur l'incertitude des chiffres qui est, par exemple, de 40 % sur le facteur d'émission du CH_4 en France ; une amélioration de la connaissance sur les flux de carbone et d'azote dans les sols agricoles et forestiers et dans la biomasse qu'ils portent apparaît comme indispensable. Plusieurs programmes de recherche avec le concours de l'ADEME sont à l'œuvre.

Comme le font remarquer le rapport CGEDD de 2013 et le rapport du CGAAER précités : « Les problèmes liés au mode de comptabilisation forfaitaire des GES du secteur des terres sont de plusieurs niveaux. »

Les émissions de N_2O , dont le poids est considérable dans le bilan GES de l'agriculture, sont calculées forfaitairement, par convention, pour tous sols et toutes cultures dans le monde, sur la base de 1% de l'azote minéral et organique qui est épandu. Or une étude récente permettrait d'adapter la méthodologie au contexte agronomique français, avec un coefficient d'émission sensiblement réduit à 0,9 ou 0,8%, et pourrait certainement être utilisée dans les prochains inventaires pour mieux approcher la vérité, sous réserve de validation des modèles calibrés et testés ;

Les émissions de CH_4 sont calculées par défaut à partir d'un ratio standard par animal, qui ne permet donc pas de prendre en compte, par exemple, l'effet des modifications du régime alimentaire des ruminants apportées par les éleveurs ou les impacts positifs de la méthanisation et de la mise en place de torchères. ;

Enfin, les variations des stocks de carbone dans les sols ne sont prises en compte par le GIEC qu'au titre des seuls changements d'usages (retournement des prairies, artificialisation...) et non pas dans le cadre de l'évolution des pratiques et des itinéraires culturaux engagée par l'agriculteur.

Ainsi, le potentiel d'atténuation maximum dans le secteur agricole par changements de pratiques dans les systèmes actuels, évalué en France à hauteur de 28,5Mt CO_2 éq par l'INRA, s'il était réalisé complètement, ne se trouverait être comptabilisé et valorisé en réalité qu'à hauteur de 10Mt CO_2 éq seulement par l'utilisation des méthodes d'inventaires actuelles ».

Le rapport de 2013 recommandait de « Soutenir la recherche sur la connaissance des flux de carbone et d'azote dans les sols agricoles et forestiers. »

Sur ce sujet, l'initiative « 4 pour 1000 »⁶⁶ (qui fait partie de l'agenda du plan d'action Lima-Paris) part du constat que « *Augmenter chaque année le stock de carbone des sols de 4 pour 1000 dans les 40 premiers centimètres du sol permettrait, en théorie, de stopper l'augmentation actuelle de la quantité de CO_2 dans l'atmosphère, à condition*

⁶⁶ <http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Web/2015-12-01/4-pour-1000-Inra.pdf>

de stopper la déforestation. ». Elle propose d'améliorer la teneur des sols en matière organique et d'encourager la séquestration du carbone dans les sols par la mise en œuvre de pratiques agricoles et forestières adéquates.

En France, le plan « agriculture innovations 2025 »⁶⁷ présenté le 22 octobre 2015 au ministère de l'agriculture et porté notamment par l'IRSTEA et l'INRA, comporte un certain nombre de pistes en matière d'agro-écologie avec trois projets (sur 30) sous la rubrique « Développer une approche système et faire de l'agriculture un contributeur à la lutte contre le dérèglement climatique » traitant de changement climatique : « *Projet 2- Améliorer la fertilité des sols et atténuer le changement climatique, Projet 3 - Anticiper le changement climatique et s'y adapter : développer et promouvoir une gestion intégrée de l'eau, Projet 4 - Anticiper le changement climatique et s'y adapter : développer un portail de services pour l'agriculture* ». D'autres projets ont des interfaces avec les problématiques climatiques, comme ceux traitant de performance, de résistance aux aléas climatiques, etc.

5.1.2. Des incertitudes liées aux formats et méthodes de mesure

Au-delà des conventions rappelées dans les paragraphes précédents, le rapport CGEDD de 2013 indique que les conventions de mesure sont sujettes à hypothèses contestables. « Par exemple, au titre de la Convention Cadre des Nations-Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC), tout végétal récolté est réputé émis immédiatement sous forme de GES, ce qui sur-valorise les usages énergétiques et décourage des actions vertueuses comme l'exploitation rationnelle de la forêt ou le stockage du bois dans la construction, les matériaux bio-sourcés et leur recyclage. Dans les nouvelles conventions, une possibilité est donnée de comptabiliser une durée de stockage de carbone hors forêt dans les matériaux produits dans chaque pays à partir de sa forêt (demi-vie de deux ans pour le papier, 25 ans pour les panneaux, 35 ans pour les sciages) ; le déficit de la France en produits bois ne lui permet toutefois pas d'en bénéficier. »

On observe aussi des réévaluations fréquentes et parfois importantes en fonction des versions successives des rapports nationaux CCNUCC. Il s'ensuit des écarts qui peuvent atteindre 10 % voire plus entre des documents basés sur des années d'inventaire différentes (données SNBC et données du dernier inventaire CITEPA pour le secteur UTCF et l'agriculture par exemple).. Ces écarts rendent difficile le travail d'analyse. Ils devraient être mieux tracés pour éviter de risquer d'en tirer des conclusions erronées.

Enfin, les scénarios prospectifs ne distinguent pas clairement dans les effets ce qui est attribuable au secteur agriculture et ce qui est attribuable au secteur UTCF.

5.1.3. Des répartitions parfois arbitraires

Toujours selon le rapport CGEDD de 2013, « *certaines imputations actuelles des émissions sont également contestables. Il faudrait attribuer les émissions énergétiques de l'agriculture à ce secteur (et non au secteur « énergie »), mais en contrepartie attribuer les émissions dues à l'artificialisation des sols aux secteurs qui en bénéficient (et non à l'UTCF).*

⁶⁷ <http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/dp-agriculture-innovation2025.pdf>

Des travaux sont en cours pour corriger certains de ces défauts, mais une évolution internationale significative est peu probable à court terme : la communauté internationale cherche à définir des règles universelles alors que les problématiques forestières, tropicale et tempérée, sont très différentes. ».

Le rapport CGEDD de 2013 recommandait d' « œuvrer pour obtenir le changement des normes internationales de prise en compte des puits de carbone dans les inventaires de GES » et, « en attendant le changement des normes, orienter l'action publique vers la recherche de la meilleure efficacité réelle, et non la maximisation des résultats selon les normes de calcul internationales lorsque celles-ci sont inadéquates ».








La recherche de la meilleure efficacité réelle paraît plus pertinente que la modification des périmètres retenus à l'échelon international : tout découpage comporte des effets de bords. Il ne faut pas forcément chercher à isoler des périmètres agriculture, sylviculture et gestion des terres. D'un autre côté il peut être regretté que l'agriculture et la forêt soient en première ligne comme moyen envisagé pour réduire les effets de l'artificialisation des sols induite par d'autres secteurs.

Plus généralement, cloisonner en silos des secteurs est contreproductif au regard des processus de décision et de jeux d'acteurs si on veut décarboner l'économie avec de la biomasse.

5.2. Trajectoires de transition bas carbone en France au moindre coût

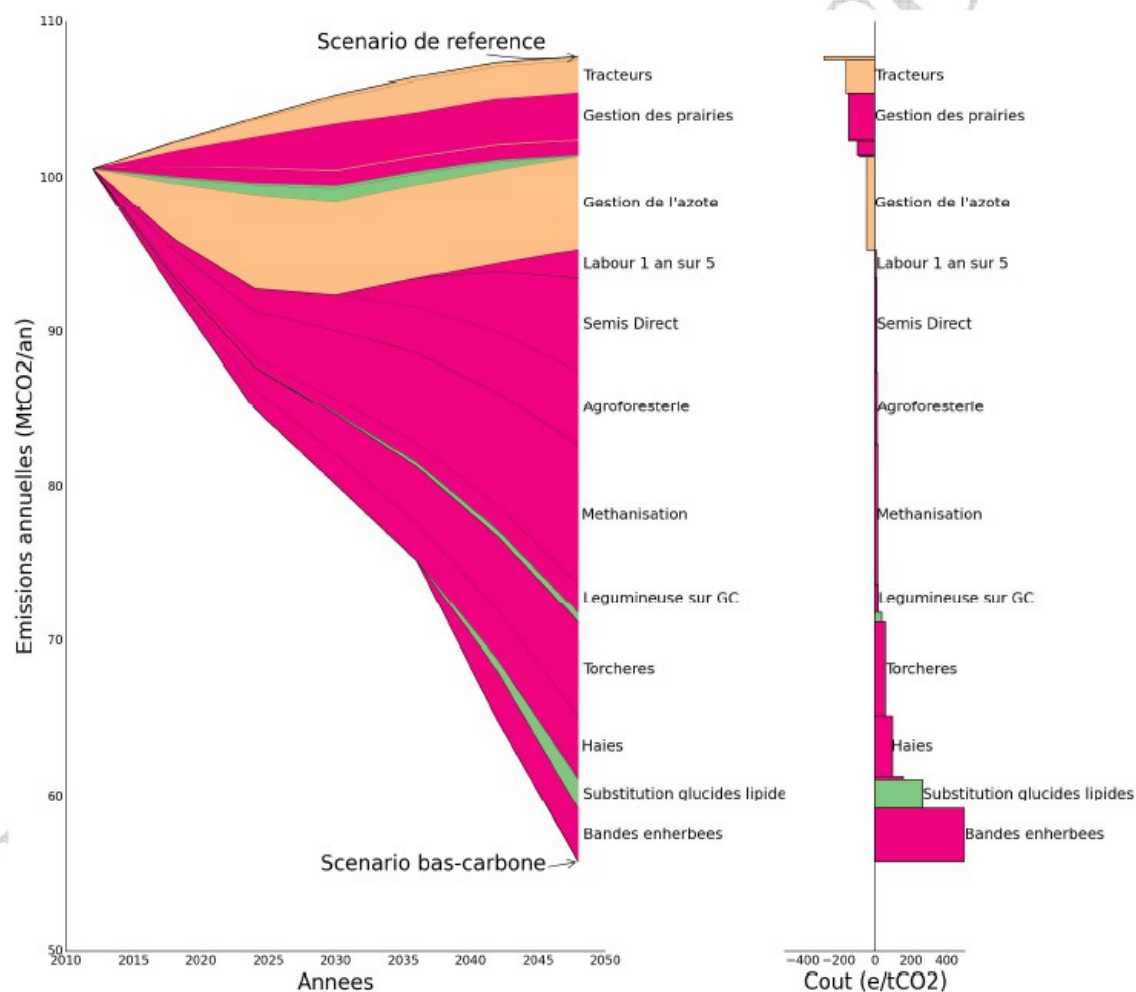
Une note du CGDD « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », dont un projet a été consulté en juin 2016 par la mission, présente des courbes dynamiques d'abattement moyen des émissions de GES permettant de quantifier les impacts et coûts de mesure, par secteur ou de manière intégrée.

Encadré 4 : Code couleur utilisé pour l'ensemble des figures

	Gisements comportementaux
	Gisements liés à structure de la demande
	Efficacité énergétique
	Changement de source d'énergie
	Décarbonation des vecteurs énergétiques
	Capture et/ou stockage des GES
	Autres
Hachures : fortes incertitudes sur les coûts	

Pour l'agriculture les résultats sont:

Figure 15 Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Agriculture

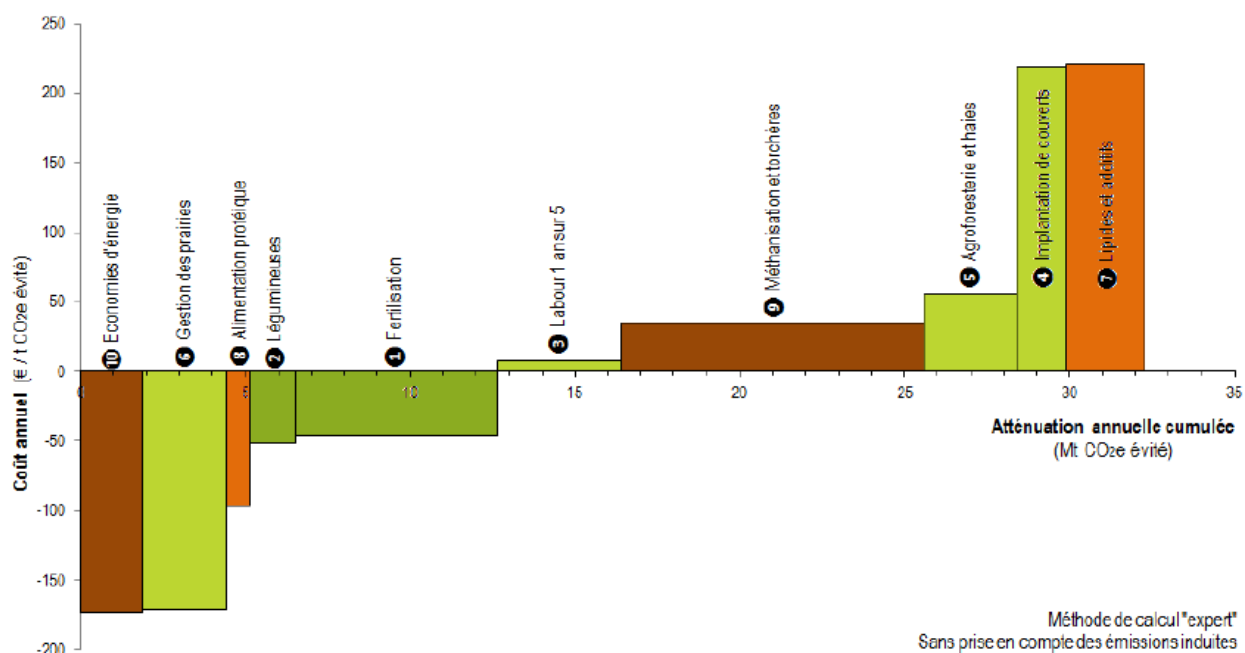


Courbes dynamiques des coûts d'abattement moyens du secteur agricole – source, trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût, CGDD, 2016

Les pratiques agricoles et la gestion des sols, la méthanisation, la constitution de puits de carbone sont, selon cette étude, et avec les précautions d'usage toujours nécessaires en matière de résultat de modélisation, les mesures à plus fort impact. Ici comme ailleurs il n'existe pas de mesure dominante permettant d'améliorer les émissions, mais un mix de mesures concourant au but commun.

Le coût élevé à la tonne de CO₂ des « bandes enherbées », et à un moindre degré par la « substitution glucides lipides » est compensé par des cobénéfices comme le maintien de la biodiversité, les luttes contre la pollution des eaux, etc.

Les études de l'INRA comportent également des graphes très convergents avec cette vision :



Source : Étude INRA Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de GES.

6. Synthèse pour le secteur de l'agriculture et l'UTCF

Comme le relève le rapport CGEDD original de 2013, le secteur de l'agriculture est susceptible au mieux, selon la littérature, d'une réduction des émissions d'un facteur 2 à l'horizon 2050 par rapport à 1990. La stratégie nationale bas carbone vise un objectif de réduction d'un facteur 2. Les mesures envisagées sont porteuses de changement significatif dans un secteur sensible.

Si l'on sait donc ce vers quoi il faut tendre, la mise en œuvre de ces évolutions est loin d'être évidente. Le grand nombre d'exploitations concernées, les conditions économiques difficiles du secteur, la façon dont sont vécus les objectifs environnementaux, l'évolution incertaine des habitudes alimentaires sont autant de freins à une implantation aisée. Par exemple les crises de l'élevage ne jouent pas en faveur du maintien et de l'augmentation des prairies, et il est difficile de maintenir des prairies naturelles si l'on diminue fortement les cheptels pour les pâturer.

Le secteur UTCF est, à la précision disponible, crédité d'émissions négatives en France (DOM inclus), c'est-à-dire de séquestration à hauteur de 50,6 Mt CO₂ éq en 2014 ce qui représente plus de 10 % des émissions globales (qui sont de 459 Mt CO₂ éq sans prise en compte de l'UTCF).

Il comporte, dans les faits, deux parties assez distinctes : l'une liée aux prairies, cultures, zones humides voire sols urbanisés ; et l'autre, de loin le puits le plus important, liée aux forêts.

La politique concernant les forêts ne peut pas avoir comme seul but de maximiser le puits de carbone correspondant, elle doit contribuer à davantage exploiter la forêt, à développer le bois combustible, le bois à des fins énergétiques (biocarburants de seconde génération), le bois comme stockage de carbone dans les constructions et surtout comme substituant, en tant que matériau, à une valorisation thermique directe. Ces objectifs sont depuis longtemps identifiés, ils restent difficiles à atteindre. Elle doit de plus se préoccuper de l'adaptation au changement climatique qui suppose des renouvellements et changements d'essences, à décider très en amont pour un climat futur encore mal cerné.

Les outils de suivi des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur UTCF et dans le secteur agricole demeurent imprécis. Des efforts de recherche coordonnés au niveau européen sont nécessaires.

Recommandations du rapport de 2013 concernant le secteur de l'agriculture et l'UTCF

10. Soutenir la recherche sur la connaissance des flux de carbone et d'azote dans les sols agricoles et forestiers.

Le sol (notamment sa capacité de séquestration ou perte de carbone et la dépendance de cette capacité aux conditions externes) reste mal connu et constitue un enjeu important. Des études diverses ont été menées : projet « no gas 2 » du CETIOM, expertises scientifiques collectives (ESCo) « stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? », « artificialisation des sols » et MAFOR (valorisation agricoles des effluents) GIS changement d'affectation des sols, etc.; l'initiative « 4 pour 1000 »⁶⁸ (qui fait partie de l'agenda du plan d'action Lima-Paris) part du constat qu'« augmenter chaque année le stock de carbone des sols de 4 pour 1000 dans les 40 premiers centimètres du sol permettrait, en théorie, de stopper l'augmentation actuelle de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère, à condition de stopper la déforestation. », et dans son cadre est en cours la synthèse des sources de connaissance sur les émissions diffuses liées à l'agriculture et la forêt. Les variabilités des propriétés du sol sont cependant très importantes, même au niveau infra-parcellaire. L'alliance globale sur la recherche (GRA) met en cohérence les programmes de recherche dans le monde. La France s'attache notamment à la problématique du stockage du carbone. La démarche d'agro-écologie, en cours de déploiement en France, est globale (accroissement des interactions biologiques, bouclage des cycles...), ne s'intéresse pas uniquement aux émissions de GES mais aussi à la consommation d'eau, à la diminution des pollutions, à la qualité et à l'érosion des sols, et elle prend aussi en compte les cycles (carbone, azote,...) qu'il faut boucler. La recommandation reste donc valable même si des efforts ont lieu.

11. Œuvrer pour obtenir le changement des normes internationales de prise en compte des puits de carbone dans les inventaires de GES.

La recommandation porte sur un sujet de préoccupation important, reste pertinente et constitue la position française. L'accord de Paris et ses dispositions pour l'amélioration des méthodes de MRV (monitoring, reporting and verification) constitue un environnement favorable. Un futur rapport du GIEC sera spécifiquement consacré aux sols. Les négociations au sein de l'UE sur le cadre énergie climat 2030 prennent en compte le secteur des terres et les modalités de cette prise en compte sont en cours de négociation. Cependant, sur ce sujet des puits de carbone la France est isolée au sein de l'Europe quand elle préconise un calcul des émissions des forêts plus en phase avec les réalités physiques, au lieu de se limiter aux écarts relevés par rapport à une « référence » théorique qui peut masquer certaines insuffisances.

Le but de l'exercice n'est pas de faire apparaître vertueux tel ou tel secteur mais de pouvoir surmonter l'approche en silos, afin de mieux internaliser les externalités et de mieux responsabiliser les acteurs, ce que permet l'approche en ACV.

⁶⁸ <http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Web/2015-12-01/4-pour-1000-Inra.pdf>

12. En attendant le changement des normes, orienter l'action publique vers la recherche de la meilleure efficacité réelle, et non la maximisation des résultats selon les normes de calcul internationales lorsque celles-ci sont inadéquates.

Ici encore cette question est au cœur des préoccupations actuelles et la prise en compte dans les inventaires évolue.

En agriculture, les cultures et prairies durables ont désormais, dans les inventaires, une composante carbone liée à la gestion, avec un effet significatif pour les cultures. Un compartiment « produits » est désormais introduit dans les inventaires. Et la SNBC incite à une prise en compte des mesures sans se limiter à celles qui apparaissent dans les inventaires agricoles.

Les politiques publiques relatives à la forêt visent bien à davantage exploiter la forêt française avec l'idée que le bilan global, notamment celui concernant les émissions de GES sera positif à long terme. Il convient de tenir compte également des spécificités de la forêt guyanaise, unique grande forêt équatoriale dans l'Union européenne. Cette recommandation reste dans son esprit pertinente. Parallèlement, il reste à améliorer le rapportage international en matière d'impact des forêts.

13. Inscrire des objectifs de réduction des émissions de GES dans la négociation 2013 de la PAC et prévoir le soutien aux mesures techniques comme la méthanisation et l'agro-foresterie via l'inclusion de l'agriculture dans les marchés de carbone, ou via une ré-orientation des aides de la PAC en cours de période 2013/2020.

La recommandation est apparemment obsolète puisque la négociation a eu lieu ; la PAC encourage le « verdissement » et le « maintien » des prairies permanentes, avec des dérogations toutefois. De plus il existe désormais en France un programme d'agro-écologie et un plan Agroforesterie lancé en 2015. Le sujet de la méthanisation est aussi objet de politiques publiques (plan Energie Méthanisation Autonomie Azote par exemple) même si certaines difficultés subsistent. La recommandation reste pertinente pour la négociation à partir de 2018 de la prochaine PAC, afin d'améliorer encore la prise en compte des émissions de GES (par exemple par l'interdiction des sols nus).

14. L'essentiel des méthodes propres à réduire les émissions de GES dans l'agriculture UTCF étant d'ores et déjà connu, développer les études et expérimentations technico-économiques explorant les conditions économiques et sociales de leur déploiement, et en déduire les aides nécessaires via la PAC et/ou l'inclusion dans les marchés de carbone.

La démarche d'agro-écologie, a été lancée en 2012 et promeut notamment les GIEE (groupements d'intérêt économique et environnemental). À ce jour, on compte 370 GIEE rassemblant 5 000 agriculteurs (sur un total de 480 000 chefs d'exploitation, ou 300 000 répondants à la PAC). Il y en aura 400 en fin d'année. Le MAAF vise l'objectif de 50 % d'agriculteurs engagés en 2025. Par ailleurs des réflexions et enquêtes ont lieu, par exemple au sein du club « carbone forêt bois » ou « club

climat agriculture », pour évaluer la motivation des acteurs, le consentement à agir et les impacts financiers associés. L'effort doit être poursuivi. Par exemple des améliorations sont possibles (en matière de méthodes de réduction d'émissions de GES) sur le carbone des sols, les mécanismes d'émission du N₂O ou la réduction du méthane entérique du cheptel. Et l'existence de mesures « à coût négatif » non mises en œuvre montre l'utilité d'élargir le champ d'investigation aux conditions économiques et sociales. La recommandation reste valable.

15. Recenser les facteurs (y compris les normes réglementaires) qui favorisent actuellement l'artificialisation des sols.

L'artificialisation des sols concerne environ 600 km²/an et un objectif de la SNBC est de la réduire à 100 km²/an en 2030. Les causes de l'artificialisation semblent bien connues : hors habitat, les implantations commerciales et le développement de l'espace public ; et pour l'habitat, développement augmentation de la population, augmentation du revenu disponible et de la surface habitable, baisse du coût des transports, appétence pour les zones « à la campagne », accroissement rapide du nombre de ménages, notamment sous l'effet des phénomènes de décohabitation (+ 38 % de 1980 à 2013, contre + 18 % pour le nombre d'habitants), et accroissement de la part de l'habitat individuel (57 % en 2013). Le phénomène dominant est l'artificialisation au voisinage des grands centres et le long des grands axes de communication. Le sujet des normes réglementaires et de l'impact de la fiscalité est sans doute moins connu. En tout état de cause, les comportements sont déterminants et leur inflexion malaisée. La recommandation est partiellement obsolète, ce qui ne dispense pas de poursuivre l'observation. A contrario, l'artificialisation des sols pourraient être partiellement ralentie soit par un encadrement des SCOT et des PLU dans le code de l'urbanisme, soit par une action concertée des MRAe lors de l'évaluation environnementale des PLU et des SCOT.

Tout cela est documenté mais encore assez peu connu. La réflexion sur les leviers d'action publique devrait être développée. La loi n°2014-1170 du 13 octobre 2014⁶⁹, dite loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt, renforce par exemple dans son article 25 la préservation des espaces agricoles, naturels et forestiers, *« complétant l'arsenal de protection des terres non urbanisées face à la pression de l'urbanisation. Il donne un rôle accru à la Commission départementale de la consommation des espaces agricoles (CDCEa) qui devient la Commission départementale des espaces naturels, agricoles et forestiers (CDPEnaF), et dont le champ d'intervention est élargi. La préservation des espaces agricoles, naturels et forestiers dans les documents de planification de l'utilisation de l'espace est encouragée. »*⁷⁰.

Enfin il faut mentionner la création en juin 2016 de l'observatoire des espaces naturels agricoles et forestiers⁷¹.

⁶⁹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000029573022&categorieLien=id>

⁷⁰ http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/160211_dp_laaf.pdf

⁷¹ <http://agriculture.gouv.fr/observatoire-des-espaces-naturels-agricoles-et-forestiers-oenaf>

16. Développer des recherches sur les causes (tenant notamment à la dérégulation du marché foncier et au droit de l'urbanisme) qui favorisent le développement de l'habitat dispersé et les déplacements motorisés.

Il existe une littérature académique abondante sur les interactions transport-urbanisme, des travaux par la SGP (Société du Grand Paris) de comparaison de modèles LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) au niveau national. Mais les recherches sont coûteuses et requièrent de l'expertise rare, d'où l'intérêt de mutualiser les efforts, avec des souhaits d'animation au niveau national d'une communauté des modélisateurs LUTI (État, régions, agglomérations, SGP...) pour mettre en commun les expériences et favoriser la cohérence d'ensemble. La recommandation reste valable.

17. Développer études et recherches sur les conséquences en termes d'émission de GES des différentes formes d'artificialisation des sols et notamment de l'éclatement urbain.

Des recherches nombreuses existent, qu'il s'agisse d'études d'élasticité précises sur l'empreinte carbone du développement des banlieues (vivre en couronne consomme six pleins d'essence de plus par an par foyer ; doubler la densité résidentielle résulte en l'économie de deux pleins par an par foyer...) ou de considérations plus générales sur la ville durable⁷². Voir recommandation 16.

18. Envisager le bois stocké (par exemple dans la construction) comme un moyen compétitif de séquestration du carbone et mettre en œuvre un programme cohérent de mobilisation et de valorisation de la ressource forestière.

La loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (adoptée le 13 octobre 2014) a reconnu d'intérêt général la séquestration du carbone dans le bois et les produits en bois. Sur la base de la loi, le programme national de la forêt et du bois (PNFB), adopté en mars 2014, décline à ce sujet plusieurs axes de travail. L'essor récent de la construction en bois témoigne d'une prise de conscience en la matière. Et la SNBC⁷³, suivant les recommandations d'un rapport CGEDD-CGEiet-CGAAER de septembre 2012⁷⁴ et d'un rapport CGAAER d'octobre 2014⁷⁵, identifie comme levier important de lutte contre le changement climatique le recours au matériau bois en substitution aux matériaux énergivores (acier, ciment, plastique). Un autre levier important identifié est la valorisation énergétique de la biomasse forestière en substitution aux combustibles fossiles. Le stockage de carbone dans les produits

⁷² <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Etalement-urbain-et.html>

⁷³ Source : SNBC, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf p. 218

⁷⁴ « Les usages non alimentaires de la biomasse », septembre 2012, http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.xsp?id=Cgpc-CGEOUV00125090&n=1&q=%28%2B%28sujet_word%3Abiomasse+sujet%3A%7Cbiomasse%7C%29%29&fulltext=&depot=&

⁷⁵ <http://agriculture.gouv.fr/telecharger/57006?token=f89b653b919a60bfed3633e8e288c3bf>

bois et la séquestration du carbone dans l'écosystème forestier complètent les leviers d'action de la forêt bois.

Ces analyses sont confirmées par un avis de l'ADEME de juin 2015, intitulé « forêt et atténuation du changement climatique »⁷⁶. En substance, l'avis fait le constat que la filière bois énergie est appelée à se développer dans le contexte de la transition énergétique, mais que l'intensification des prélèvements en bois peut avoir pour conséquence de diminuer le rythme de séquestration du carbone dans les écosystèmes même si les stocks croissent.

Il est donc nécessaire de compenser ce manque de séquestration en procédant à la séquestration additionnelle dans les produits bois pendant une durée suffisante, au-delà de laquelle le bilan est positif. L'avis de l'ADEME constate l'importance de l'effet de substitution consécutif à l'utilisation du bois matériaux (en moyenne 1,1 tCO₂eq évité par m³ de bois contenu dans les produits finis) double de l'effet de substitution énergétique (1 m³ de bois rond utilisé en production de chaleur évite environ 0,5 tCO₂). Il conclut à l'utilité d'une approche en analyse du cycle de vie, et spécifiquement d'une optimisation du recours au bois grâce à une « cascade » d'utilisations successives : d'abord utilisation en bois matériau, puis recyclage, et enfin valorisation énergétique lorsque le recyclage en matériau n'est plus possible.

Enfin, l'étude « Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 »⁷⁷ réalisée par l'INRA pour le compte du MAAF en 2016 traite des leviers forestiers permettant d'atténuer les émissions nettes de CO₂ de la France. Le périmètre géographique est la France métropolitaine. L'étude présente le flux de matières et de dioxyde de carbone de la filière bois.

On peut considérer que cette recommandation a été suivie de travaux qui répondent à ses préoccupations et qu'il reste à poursuivre la mise en œuvre d'une politique de stockage du CO₂ dans le bois, notamment dans la construction.

19. Développer des modélisations sylvicoles et économiques permettant de répondre à la nécessité d'une gestion plus active des forêts, en réponse aux besoins d'adaptation et d'atténuation nés des effets du changement climatique.

Voir recommandation 18 précédente. Le PNFB doit dynamiser la gestion forestière au travers de six axes dont un relatif au soutien de la R&D sur l'amont forestier et la sylviculture. La question de la faisabilité d'une gestion plus active des forêts reste par contre posée, en raison de particularités liées aux essences (feuillus surtout alors que les capacités de sciage portent plutôt sur les résineux), à l'éclatement des propriétaires (même si 10 % des propriétaires possèdent 75 % du bois, ce qui justifie le ciblage par le PNFB des propriétés de plus de quatre hectares), aux questions d'accès (le PNFB recommande d'ailleurs d'améliorer l'accessibilité des massifs), à l'importance de la forêt non gérée en France, etc. La recommandation reste donc actuelle même si des travaux sont en cours.

⁷⁶ http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis_ademe_foret-attenuation-cght-clim_vdef.pdf

⁷⁷ <http://agriculture.gouv.fr/leviers-forestiers-en-termes-dattenuation-pour-lutter-contre-le-changement-climatique-aux-horizons>



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

Annexe thématique sur le bâtiment

Rapport n° 008378-02
établi par

Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF (coordonnateur), Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT

Février 2017



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction de ce rapport.

Sommaire

1. Introduction / contexte général.....	4
1.1. Un potentiel d'amélioration confirmé dans le secteur du bâtiment.....	4
1.2. Les obstacles relevés par le rapport de 2013 dans le secteur du bâtiment.....	4
1.3. Les points clés et recommandations du rapport de 2013 sur le secteur du bâtiment.....	5
1.3.1. <i>Les points clés du rapport de 2013.....</i>	<i>5</i>
1.3.2. <i>Les recommandations du rapport de 2013.....</i>	<i>7</i>
1.4. Les objectifs de l'actualisation relative au secteur du bâtiment.....	8
 1. État des lieux et scénarios : le bâtiment, un secteur majeur pour le facteur 4	 10
1.1. Les ordres de grandeur et évolutions récentes.....	10
1.1.1. <i>Des consommations et émissions stabilisées.....</i>	<i>10</i>
1.1.2. <i>Une empreinte carbone dans la moyenne nationale.....</i>	<i>12</i>
1.1.3. <i>Interdépendance des émissions.....</i>	<i>14</i>
1.1.4. <i>Un tassement conjoncturel de la construction neuve.....</i>	<i>15</i>
1.1.5. <i>Les performances énergétiques et en termes d'émissions des logements neufs.....</i>	<i>15</i>
1.1.6. <i>Une situation mitigée en matière de rénovation.....</i>	<i>18</i>
1.2. Exercices de prospective récents.....	27
1.2.1. <i>Le scénario Négawatt de 2011 : sobriété, efficacité.....</i>	<i>27</i>
1.2.2. <i>Le rapport du comité « trajectoire » de 2011.....</i>	<i>28</i>
1.2.3. <i>La «Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 ».....</i>	<i>29</i>
1.2.4. <i>Les scénarios du débat national pour la transition énergétique (DNTE).....</i>	<i>30</i>
1.2.5. <i>Suite du DNTE : les travaux du DDPP de 2015.....</i>	<i>31</i>
1.2.6. <i>Suite du DNTE et du DDPP : les scénarios de l'ANCRE de 2015.....</i>	<i>33</i>
 2. Quelques enjeux techniques, considérations économiques, et contexte réglementaire.....	 35
2.1. Quelques enjeux techniques : chauffage, confort d'été, carbone « gris », électricité spécifique.....	36
2.1.1. <i>Le chauffage, premier poste de consommation d'énergie et premier émetteur de GES</i>	<i>36</i>
2.1.2. <i>La nécessaire prise en compte du confort d'été, dans le contexte du changement climatique.....</i>	<i>44</i>
2.1.3. <i>Le carbone gris : vers une nécessaire analyse du cycle de vie et une plus grande utilisation des matériaux biosourcés.....</i>	<i>45</i>
2.1.4. <i>Les équipements électriques et électroniques : une consommation électrique et des émissions en hausse.....</i>	<i>50</i>
2.2. Coûts des mesures, priorisation, phasage : des choix délicats.....	51
2.2.1. <i>Les analyses du rapport CGEDD de 2013.....</i>	<i>52</i>
2.2.2. <i>Quelques courbes d'abattement récentes du CGDD – des investissements qui payent à long terme.....</i>	<i>60</i>
2.2.3. <i>Une analyse de Carbone 4 : la rénovation BBC rentable, la construction BEPOS beaucoup moins sauf prix du carbone très élevé.....</i>	<i>62</i>

2.3. Réglementations thermiques – une efficacité tributaire des volumes de construction et de rénovation.....	62
3. Les cibles et contraintes nationales et internationales.....	66
3.1. La LTECV.....	66
3.2. La SNBC.....	67
3.3. Engagements européens et internationaux de la France.....	68
4. Avancées, obstacles, pistes de progrès.....	69
4.1. Des avancées récentes.....	70
4.1.1. <i>Un ensemble d'aides publiques pour surmonter les obstacles économiques.</i>	70
4.1.2. <i>Vers une réglementation thermique plus ambitieuse en 2018, concertée sur la base du cycle de vie et du label « énergie-carbone ».....</i>	75
4.1.3. <i>Quelques évolutions législatives et réglementaires pour surmonter les obstacles urbanistiques.....</i>	76
4.1.4. <i>Comportements, pratiques sociales, accompagnement.....</i>	77
4.1.5. <i>Vers une meilleure prise en compte de l'énergie grise.....</i>	86
4.2. Les voies de progrès à approfondir.....	86
4.2.1. <i>Les écarts entre les économies d'énergie théoriques et réellement constatées.....</i>	86
4.2.2. <i>Une insuffisante organisation des filières professionnelles.....</i>	90
4.2.3. <i>Des efforts à faire, à terme, pour maîtriser la part relative croissante d'énergie consommée par les équipements.....</i>	94
4.2.4. <i>Des pistes pour renforcer la part des logements en collectifs.....</i>	95
4.2.5. <i>Développer et soutenir l'usage des matériaux biosourcés.....</i>	96
4.2.6. <i>Étendre la mobilisation à l'échelle du quartier et du territoire.....</i>	98
4.2.7. <i>L'exemplarité des institutions publiques, à commencer par l'État, reste à démontrer.....</i>	103
4.2.8. <i>La problématique spécifique du tertiaire.....</i>	108
5. Synthèse et perspectives.....	113
5.1. Mieux suivre ce qui se passe.....	113
5.2. Donner la priorité à la réduction des émissions de GES et approfondir l'enjeu de la production d'énergie par et pour le bâtiment.....	113
5.3. Une action auprès des grands maîtres d'ouvrage et pour les bâtiments publics.....	115
5.4. Gisements d'amélioration.....	115
5.5. Rénovation globale.....	116
5.6. Des pistes de systématisation.....	117
5.7. La nécessaire simplification de l'offre.....	118
5.8. Au-delà de la rénovation BBC.....	119
5.9. Maîtriser les coûts, inventer une ingénierie financière et garantir les retours sur investissements.....	119
5.10. Comprendre la demande et s'adapter aux marchés.....	121
6. Conclusion générale de l'annexe bâtiments.....	123
Recommandations du rapport de 2013 concernant le secteur du bâtiment. .	125

1. Introduction / contexte général

1.1. Un potentiel d'amélioration confirmé dans le secteur du bâtiment

Le rapport CGEDD 2013 se réfère à l'article 3 de la loi « Grenelle I » du 3 août 2009¹ : *« Le secteur du bâtiment, qui consomme plus de 40 % de l'énergie finale et contribue pour près du quart aux émissions nationales de gaz à effet de serre, représente le principal gisement d'économies d'énergie exploitable immédiatement. Un plan de rénovation énergétique et thermique des bâtiments existants et de réduction des consommations énergétiques des constructions neuves, réalisé à grande échelle, réduira durablement les dépenses énergétiques, améliorera le pouvoir d'achat des ménages et contribuera à la réduction des émissions de dioxyde de carbone. Cette amélioration implique le développement et la diffusion de nouvelles technologies dans la construction neuve et la mise en œuvre d'un programme de rénovation accélérée du parc existant ... ».*

Ces considérations restent valables. En 2014, le secteur représentait 45,1 % de la consommation finale d'énergie² et 26,6 % des émissions de CO₂.

Les scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre prévoient des diminutions très significatives des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ des secteurs résidentiels et tertiaires (voir par exemple, ci-après, les budgets carbone de la stratégie nationale bas carbone ou SNBC). Ils prévoient par ailleurs un démarrage rapide des efforts correspondants (cf. *infra*).

Déjà la loi Grenelle 1 de 2009 prévoyait de diminuer de 38 % la consommation énergétique avant 2020. À l'époque les émissions de GES du bâtiment étaient d'environ 100 MtCO₂eq, proches de la valeur des émissions en 2013 donc, cet objectif correspondait donc à environ 62 MtCO₂eq en 2020. On verra *infra* que c'est l'ordre de grandeur des objectifs des budgets carbone de la SNBC.

Le constat de l'importance du secteur du bâtiment et de son potentiel subsiste donc.

1.2. Les obstacles relevés par le rapport de 2013 dans le secteur du bâtiment

Cependant, le rapport CGEDD de 2013 pointait les obstacles à cette évolution, en indiquant :

« Il s'agit là de scénarios volontaristes [normatifs], partant de l'hypothèse de la réalisation du facteur 4 en 2050, et qui l'atteignent par construction. Tous les techniciens s'accordent à considérer qu'aucun obstacle de nature purement technique ne s'oppose à cette perspective. Les problèmes à résoudre sont de natures différentes :

- *économique : une étude³ du Commissariat général au développement durable (CGDD) laisse entrevoir une loi des rendements décroissants. Elle comporte une*

¹ Loi N° 2009-967 / JO du 5 août 2009

² <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2360/112/bilan-energetique-france-2014.html>

³ Études et documents n° 58, novembre 2011.

matrice des « coûts de transition » entre les différentes classes⁴ du diagnostic de performance énergétique : passer de G à F coûterait ainsi 50 €/m², mais passer de B à A coûterait 350 €/m²⁵. Il sera sans doute raisonnable de s'en tenir aux classes B voire C pour une part importante du parc existant ;

- esthétique (dans les centres anciens par exemple) : en l'état actuel des techniques, l'isolation par l'extérieur se heurte aux exigences esthétiques, tandis que l'isolation par l'intérieur « coûte » de précieuses surfaces habitables⁶ ;
- et de pratique sociale (cf. les « effets rebond »⁷) : les consommations réelles sont en fait difficiles à calculer a priori : presque tous les bâtiments de bureaux « basse consommation » construits ces dernières années et ayant fait l'objet d'une vérification soignée des performances ont donné lieu, au moins la première année, à des déconvenues, les consommations réelles s'établissant à un niveau nettement supérieur aux calculs de conception. »

Ces obstacles, on le verra, subsistent dans une certaine mesure mais demandent actualisation.

1.3. Les points clés et recommandations du rapport de 2013 sur le secteur du bâtiment

Le rapport CGEDD de 2013 s'est aussi traduit par 12 points clés et 33 recommandations, dont certaines peuvent être rattachées au secteur du bâtiment.

1.3.1. Les points clés du rapport de 2013

Le rapport CGEDD de 2013 a effectué le signalement de « 12 points clé soumis au débat », dont plusieurs portent spécifiquement ou partiellement sur le secteur du bâtiment.

Le 7ème point clé « Le bâtiment constitue le gisement le plus immédiatement exploitable d'économies de GES, même si les coûts d'abattement peuvent y être élevés. La mission constate la bonne acceptation des réglementations dans le neuf, mais des signes d'essoufflement de l'effort dans le parc existant. Elle estime qu'il y a nécessité d'envisager des obligations de faire dans ce secteur (formulées autant que possible en termes de résultat) en s'appuyant, le cas échéant, sur les grands opérateurs (sur le mode des certificats d'économie d'énergie). » est spécifique au secteur. De fait, comme on le verra dans la présente annexe, le secteur du bâtiment est bien celui qui est le plus sollicité dans la SNBC, avec des objectifs de réduction des émissions annuelles de -23%, -20% et -25% sur les trois périodes 2015-2018, 2019-

⁴ Les logements sont répartis en classes selon leur consommation énergétique (mesurée en kWh/m²/an). La classe A, la plus économe, regroupe les logements consommant moins de 50 kWh/m²/an.

⁵ Les chiffres cités par le rapport de 2013 méritent actualisation

⁶ Et, neutralisant l'inertie des murs, pose des problèmes de confort d'été.

⁷ On constate que les occupants ayant amélioré la performance énergétique de leurs locaux augmentent en général leur niveau de confort (par exemple en augmentant la température), neutralisant une partie de l'économie théorique : c'est ce phénomène qui est appelé « effet rebond ». Des études sont en cours pour en appréhender les modalités et le volume). Il existe aussi un effet « rebond », lié à une méconnaissance du système énergétique à modéliser ce qui conduit à des estimations erronées.

2023 et 2024-2028 par rapport à 2013⁸. Mais les modalités d'exploitation de ce gisement d'amélioration restent encore ouvertes.

D'autres points clés du rapport de CGEDD de 2013 ont des accroches avec le secteur du bâtiment.

Le 9ème point clé « *La biomasse, en particulier le bois, doit être considérée d'abord comme un matériau et une source de matière première renouvelable susceptible de remplacer efficacement d'autres matériaux et sources d'énergie, en évitant des émissions de GES. Ce faisant, c'est en outre un outil peu onéreux pour capter et séquestrer du carbone : la gestion de la forêt française est un enjeu important pour l'économie des GES.* » évoque l'enjeu de la construction en bois.

Le 10ème point clé « *Les déplacements de courte et moyenne distance (urbains et périurbains notamment) peuvent connaître une révolution en deux décennies, qui les amène à une décarbonation prononcée, grâce au développement des « modes doux » et des services partagés, mais aussi à des systèmes globaux intégrant véhicules électriques, stockages d'énergie liées à l'habitat, production locale d'énergies intermittentes décarbonées et « réseaux intelligents » (« smart grids »⁹), etc.. Ces formes d'intégration, aujourd'hui encore loin de la rentabilité, pourront entrer dans le marché dans la décennie 2020-2030 et il faut s'y préparer dès maintenant.* » est liée aux problématiques de l'énergie 2.0, de la domotique, de l'autoproduction et de l'autoconsommation. Elles peuvent être rendues quasi-obligatoires par une obligation réglementaire de construire des bâtiments à énergie positive.

Le 11ème point clé « *La difficile question des comportements doit être approfondie : les Français ne donnent pas dans leur comportement une grande priorité à la lutte contre les émissions de GES. Il faut poursuivre les recherches permettant de comprendre comment parvenir à une mobilisation à la hauteur de l'enjeu, et entreprendre des efforts importants de pédagogie.* » a une importance particulière dans le secteur du bâtiment, où les consommations attendues et réelles sont souvent différentes, entre autres en raison de comportements mal connus, de l'effet rebond, etc.

D'autres point clés peuvent être déclinés sur le secteur du bâtiment, par exemple :

le second point clé « *La France respecte formellement ses engagements au titre du protocole de Kyoto¹⁰, mais il s'agit d'un résultat en trompe l'œil : l'« empreinte carbone » par habitant des Français a augmenté de 15 % en 20 ans si on prend en compte le solde des échanges extérieurs de GES.* », met en exergue le fait que l'empreinte carbone française dépasse de moitié environ les émissions territoriales¹¹ ; le cas du bâtiment peut aussi être examiné sous ce prisme.

⁸ Ceci amène certains à se poser la question de savoir si un effort supplémentaire ne peut être consenti par d'autres secteurs, comme, par exemple, les transports.

⁹ Il s'agit essentiellement de la démarche énergie 2.0 ou « 3^e révolution industrielle » portée par Jeremy Rifkin. En France quelques expériences ont lieu actuellement : Issy Grid, ...

¹⁰ Note : l'engagement Kyoto de la France est +0 % en 2008-2012 par rapport à 1990 ; le réalisé est -10,6 %

¹¹ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_du_climat_2016.pdf , page 26 : les estimations d'empreinte en 2012 sont de 666 MtCO₂éq ou encore 10,5 tCO₂éq par habitant ; les émissions territoriales en 2012 sont de 460 MtCO₂éq ou encore 7,3tCO₂éq par habitant . L'empreinte est donc 45 % supérieure aux émissions territoriales ; l'empreinte par habitant est 44 % supérieure à l'émission par habitant.

le 3ème point clé « Le « paquet climat-énergie » européen sur lequel la plupart des pays européens fondent leur programmation reporte de manière injustifiée les efforts à plus tard. Il prévoit un rythme de diminution relative des émissions faible entre 1990 et 2020 (20 % en 30 ans soit 0,7 % par an) puis un rythme croissant de diminution de décennie en décennie pour imposer à nos successeurs des années 2040 à 2050 un rythme insoutenable, sauf miracle technologique (plus de 6 % par an). Rien ne justifie une telle préférence pour le présent. La « feuille de route » européenne de mars 2012 évoque une réduction de 25 % en 2020 au lieu de 20 % : il est indispensable que la France s'y associe et l'applique pour elle-même. » reste un souci aussi pour le bâtiment ; le secteur du bâtiment, très sollicité dans la stratégie nationale bas carbone (passage de 90 MtCO₂eq en 1990 et 99 MtCO₂eq en 2013 à 46 MtCO₂eq en 2028) échappe plus à cette préférence pour le présent que d'autres secteurs, mais son objectif pour 2050 est de l'ordre du facteur 6 ou 7 (soit moins de 15 MtCO₂eq) ce qui suppose, pour lui aussi, une accélération de l'effort à moyen terme.

1.3.2. Les recommandations du rapport de 2013

Le rapport CGEDD de 2013 a aussi produit 33 recommandations, dont neuf concernent spécifiquement le secteur du bâtiment (recommandations 18, 20 à 25, 29, 32), et au moins sept peuvent s'appliquer au secteur du bâtiment et de l'habitat (1, 8, 15 à 17, 30 et 31).

Pour mémoire :

« 1 Organiser la fonction d' «observatoire du facteur 4» avec les acteurs en place, en faisant converger système de mesure, évaluation des politiques publiques, évaluation des perspectives technologiques et économiques, vulgarisation et pédagogie

8 Favoriser les nouveaux services de mobilité décarbonée, notamment dans l'habitat diffus¹²

15 Recenser les facteurs (y compris les normes réglementaires) qui favorisent actuellement l'artificialisation des sols¹³.

16 Développer des recherches sur les causes (tenant notamment à la dérégulation du marché foncier et au droit de l'urbanisme) qui favorisent le développement de l'habitat dispersé et les déplacements motorisés¹⁴.

17 Développer études et recherches sur les conséquences en termes d'émission de GES des différentes formes d'artificialisation des sols et notamment de l'éclatement urbain¹⁵.

18 Envisager le bois stocké (par exemple dans la construction) comme un moyen compétitif de séquestration du carbone et mettre en œuvre un programme cohérent de mobilisation et de valorisation de la ressource forestière

20 Dans le domaine du bâtiment, redonner la priorité à la lutte contre les émissions de GES ; reconsidérer à cet égard le principe de l'évaluation en énergie primaire.

¹² Recommandation aussi et surtout liée au secteur des transports

¹³ Recommandation aussi et surtout liée au secteur UTCF

¹⁴ Recommandation aussi et surtout liée au secteur UTCF

¹⁵ Recommandation aussi et surtout liée au secteur UTCF

21 Dans le domaine du bâtiment, poser clairement le plus tôt possible les problématiques d'écart entre les économies théoriques et les économies constatées de façon à engager la recherche de solutions. Développer la recherche et les études permettant de comprendre les causes de ces écarts, pour s'efforcer d'y remédier.

22 Confier aux grands opérateurs (notamment fournisseurs d'énergie) la mission de promouvoir des formules « clé en main » auprès de leurs clients, comportant étude technique et financière des travaux, offre de financement et remboursement intégré aux factures d'énergie.

23 Donner aux opérateurs précités des obligations annuelles de résultat relatifs à cette procédure « clé en main » sur le mode des certificats d'économie d'énergie.

24 Dimensionner ces obligations de résultat pour l'atteinte des objectifs fixés au niveau national en matière d'économies de GES (et non d'énergie).

25 Améliorer la connaissance du « gisement » d'économies de CO₂ dans le bâtiment et de la rentabilité globale de chaque catégorie de travaux selon les hypothèses d'évolution des coûts de l'énergie et tenir à jour cette connaissance. Promouvoir la recherche dans ce sens.

29 Faire des paris, notamment à l'occasion de la réflexion sur les normes de construction pour 2020, sur les développements de « l'énergie 2.0 » et en tout cas laisser ouvertes les possibilités de déploiement de ces systèmes.

30 Développer les recherches sur les comportements réels vis-à-vis des paramètres environnementaux.

31 Engager des programmes importants de sensibilisation, de formation et d'information sur le changement climatique et les moyens concrets de réduire les émissions de GES envers les « corps intermédiaires » de professionnels au contact du public.

32 Poser le plus tôt possible la question des limites et des obstacles qui risquent d'être rencontrés dans la rénovation thermique lourde du parc de bâtiments afin de s'engager sans attendre dans la recherche de solutions »

Un objectif de la présente annexe est de faire le point sur ces recommandations et si nécessaire de les actualiser ou compléter.

1.4. Les objectifs de l'actualisation relative au secteur du bâtiment

La présente actualisation s'attache donc à examiner, au regard du passé (émissions), et des scénarios pour le futur, les évolutions susceptibles d'affecter les constats de 2013¹⁶, et les dispositions prises depuis 2013, au regard des objectifs quantitatifs décidés. Elle s'intéresse aux dispositions permettant de franchir les obstacles précités, à commencer par celles figurant dans la LTECV (loi de transition énergétique pour la croissance verte) et la SNBC (stratégie nationale bas carbone), pour ce qui concerne leurs volets « bâtiment », mais aussi pour des dispositions qui y contribuent, comme la

¹⁶ Un exemple en est le premier alinéa de la citation précédente et notamment la citation « passer de G à F coûterait ainsi 50 €/m², mais passer de B à A coûterait 350 €/m² ». Ces données se basent sur une matrice dont les termes ont significativement évolué par la suite semble-t-il. Avec les nouvelles données disponibles, passer de G à F coûterait ainsi 76 €/m², mais passer de B à A coûterait 110 €/m². Les conclusions changent alors. Détails *infra*

lutte contre la précarité énergétique. Elle fait le point sur l'avancement de la mise en œuvre de ces dispositions, et examine l'actualité des recommandations du rapport CGEDD de 2013.

1. État des lieux et scénarios : le bâtiment, un secteur majeur pour le facteur 4

1.1. Les ordres de grandeur et évolutions récentes

Pour mémoire, en ce qui concerne le stock de logements individuels et collectifs, le rapport CGEDD de 2013 indique que « *Le secteur résidentiel compte actuellement 33 millions¹⁷ de logements, dont 27,7 millions de résidences principales, représentant 2,55 milliards de m², se répartissant en 18,6 millions de maisons individuelles (1,75 milliard de m²) et 14,4 millions d'appartements en logements collectifs (892 millions de m²)* ».

En ce qui concerne le secteur non résidentiel, très hétérogène, « *En 2009, le secteur non résidentiel représentait 912 millions de m² chauffés, dont 22% pour les bureaux et pour les commerces, 20% pour l'enseignement, 12% pour la santé, 7% pour le sport, au même niveau que pour les cafés, hôtels et restaurants et que pour l'habitat communautaire, 3% pour le transport.* »

« *L'accroissement du parc de logements est dû essentiellement à la construction neuve, puisque le solde des échanges avec le parc tertiaire est très faible, de même que le taux de sortie (démolition) qui est de l'ordre de 0,1% par an. Les variations sont du même ordre de grandeur pour le non résidentiel.* »¹⁸.

Ces ordres de grandeur du stock restent donc actuels : selon l'INSEE¹⁹, en 2016, il y avait environ 34,5 millions de logements en France ; et les bâtiments tertiaires représentaient en 2013 une surface chauffée près de 940 millions de m².²⁰ Et pour mémoire, environ 350 000 logements neufs ont été construits en 2013.

1.1.1. Des consommations et émissions stabilisées

Le panorama énergie-climat de 2015²¹, établi par la DGEC, rappelle, dans sa fiche N°4 (Maîtriser la demande en énergie et promouvoir l'efficacité énergétique) la part prépondérante du bâtiment (résidentiel-tertiaire) dans la consommation finale énergétique (67,7 Mtep en 2014), avec une tendance, corrigée des variations climatiques, vers une certaine stabilisation, voire décroissance depuis 2009.

Sur une plus longue période, les consommations d'énergie finale ont augmenté depuis 1990 puis se sont stabilisées depuis le début des années 2000, tant en valeur absolue corrigée des variations climatiques (57,7 Mtep en 1990 devenant 68,5 Mtep en 2011 et 67,7 Mtep en 2014²²) qu'en proportion de la consommation finale totale (de 41 à

¹⁷ 32 millions en 2009 et 33,6 millions en 2013 selon l'INSEE dont 27,8 millions de résidences principales, Selon les comptes du logement il y aurait 5,4 millions de ménages dans le parc social.

¹⁸ Stratégie Rénovation énergétique des bâtiments dans l'objectif du Facteur 4 – Période 2013-2020, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/strategie-renovation-energetique-batiments-objectif-facteur-4-2014.pdf>

¹⁹ Source : <http://www.insee.fr/fr/themes/series-longues.asp?indicateur=nombre-logements-type>

²⁰ source, chiffres clés climat air énergie, ADEME, édition 2015, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

²¹ <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/154000517/index.shtml>

²² Chiffres clés de l'énergie, édition 2015 de février 2016, CGDD, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2016/reperes-chiffres-

44,1 % puis 41,2 %). De leur côté les émissions de CO₂ liées à la combustion d'énergie fossile²³ augmentaient plus modérément voire décroissaient en valeur absolue (en données réelles d'environ 88 Mt CO₂ éq en 1990 à 77 Mt CO₂ éq en 2011 et 72 Mt CO₂ éq en 2014, grâce à un hiver doux notamment ; en données corrigées des variations climatiques, de 95 Mt CO₂ en 1990 à 89 Mt en 2011 et 84 Mt CO₂ en 2014) et restaient stables en valeur relative (en données corrigées des variations climatiques, 25,4 % en 2011 comme en 1990 et 26,6 % en 2014)²⁴.

Si l'on décompose les émissions réelles (non corrigées) de GES en distinguant logements et tertiaire, on a selon le CITEPA²⁵ :

- en 2011, les 78 Mt CO₂éq²⁶ correspondent à des émissions de 52 Mt CO₂éq pour les logements et 27 Mt CO₂éq pour le tertiaire;
- en 2014, les 72 Mt CO₂éq de 2014 correspondent à des émissions de 48 Mt pour les logements et 24 Mt CO₂éq pour le tertiaire

Ces chiffres font donc apparaître, sur les années récentes, une -faible- amélioration des émissions de GES dans le résidentiel et dans le tertiaire.

Ces chiffres sont corrélés aux consommations d'énergie finales du résidentiel (stables voire en décroissance depuis le milieu des années 2000) et du tertiaire (d'abord croissantes mais qui plafonnent depuis 2008).²⁷

À plus long terme la tendance à l'amélioration est aussi perceptible, notamment en termes de consommation d'énergie finale depuis les années 2000²⁸. Il est probable que la « décarbonation » constatée dans le secteur tient au poids croissant du chauffage électrique, mais aussi du chauffage au gaz, dans la construction neuve de logements, dans les années 1990 et 2000, au détriment du fioul domestique²⁹. De manière générale et sur ce dernier point, la consommation de fioul baisse régulièrement depuis les années 1990 dans le tertiaire, et depuis 2000 dans les résidences principales³⁰.

[cles-energie-2015.pdf](#)

²³ À distinguer des émissions de GES dues à l'ensemble du secteur. Ces chiffres n'intègrent pas les émissions de GES issues de la production de l'énergie.

²⁴ Sources SOeS, bilan énergétique de la France (http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/References/2012/references-bilan-energetique-pour-2011-modif04122012.pdf et <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2360/112/bilan-energetique-france-2014.html>); et aussi données CITEPA, http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/SECTEN/SECTEN-Fichiers_avril2016.zip, fichier PlanCLimatKyoto-ed6avril16.xlsx

²⁵ http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/SECTEN/SECTEN-Fichiers_avril2016.zip

²⁶ Mais 89 Mt CO₂éq si corrigé des variations climatiques

²⁷ Voir par exemple « Climat, air et énergie – édition 2015 – chiffres clés », ADEME, juin 2016, pp. 66 et 68, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-climat-energie-web.pdf>

²⁸ source, chiffres clés climat air énergie, ADEME, édition 2015, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

²⁹ De 1990 à 2011, la consommation de produits pétroliers par le secteur « résidentiel/tertiaire » est passée de 18 à 11,6 Mtep, celle d'électricité de 14,9 à 25, celle de gaz de 13,8 à 21,9, celle du charbon de 1,8 à 0,3, et donc celle, totale, d'énergie fossile de 33,6 à 33,8. Il faut noter un fort regain du gaz dans les logements neufs depuis notamment l'avènement de la réglementation thermique 2012 (RT 2012).

³⁰ Voir par exemple « Climat, air et énergie – édition 2015 – chiffres clés », ADEME, juin 2016, pp. 66 et 68, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-climat-energie-web.pdf>

Cependant, comme on le verra *infra*, ces améliorations sont insuffisantes au regard des rythmes d'amélioration requis pour l'atteinte du Facteur 4 en général, et du facteur encore supérieur requis pour le bâtiment. En dépit des améliorations en termes d'efficacité énergétique, la surface chauffée continue de croître, et les émissions du secteur du bâtiment restent globalement assez stables en dépit de fluctuations significatives. La SNBC³¹ -Stratégie Nationale Bas carbone- (voir *infra*) vise par exemple, pour le secteur bâtiment (résidentiel-tertiaire), un rythme de baisse d'émissions d'environ 6 %/an alors que selon le plan Bâtiment durable³², les baisses annuelles observées sur la période 2007-2014 sont de l'ordre de -1,5 % (voire 3 % si l'on élargit aux émissions du secteur électrique attribuables au bâtiment).

Les deux pistes les plus apparentes d'amélioration passent par des bâtiments neufs plus efficaces énergétiquement, et donc moins consommateurs, mais aussi et surtout par un effort majeur de rénovation énergétique dans les bâtiments existants.

1.1.2. Une empreinte carbone dans la moyenne nationale

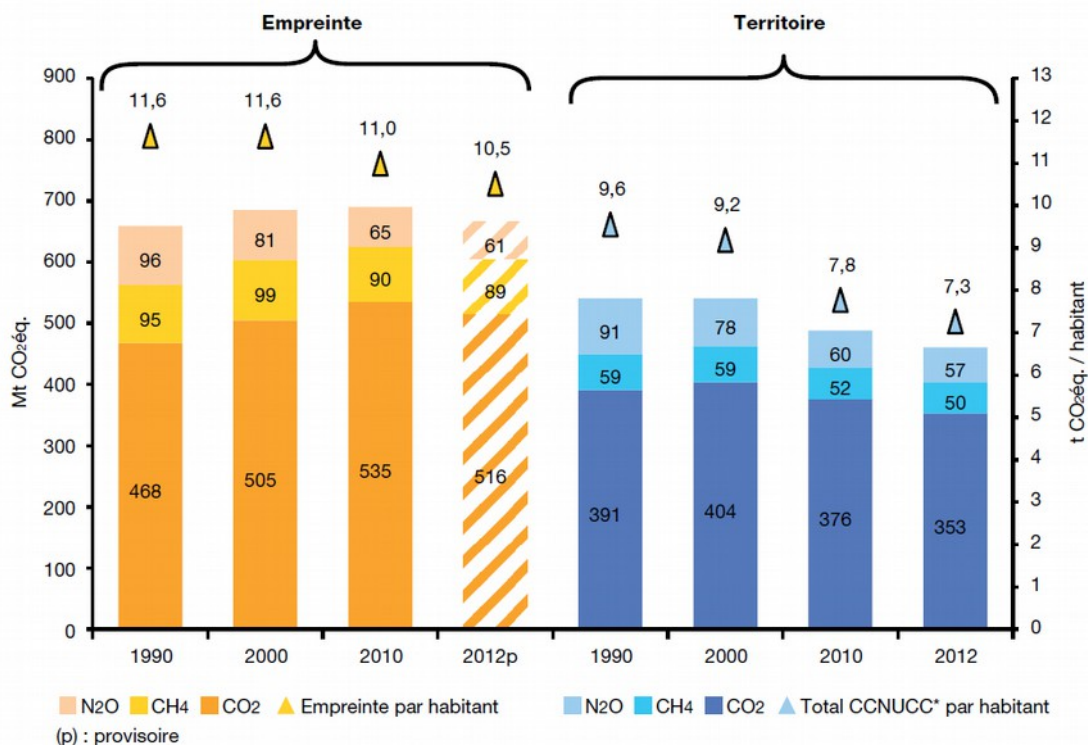
Les émissions de GES sur le territoire, associées au secteur, ne représentent pas la totalité de l'impact GES, en raison des importations utilisées dans le processus de construction et fonctionnement du bâtiment, importations elles-mêmes affectées d'émissions liées à leur production.

En France les estimations d'empreinte en 2012 sont de 666 MtCO₂eq ou encore 10,5 tCO₂eq par habitant ; les émissions territoriales en 2012 sont de 460 MtCO₂eq ou encore 7,3tCO₂eq par habitant. L'empreinte est donc environ 45 % supérieure aux émissions territoriales ; l'empreinte par habitant est de même environ 45 % supérieure à l'émission par habitant³³.

³¹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>

³² http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_pbd_2016_donnees_2014_vf.pdf

³³ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_du_climat_2016.pdf , page 26 :

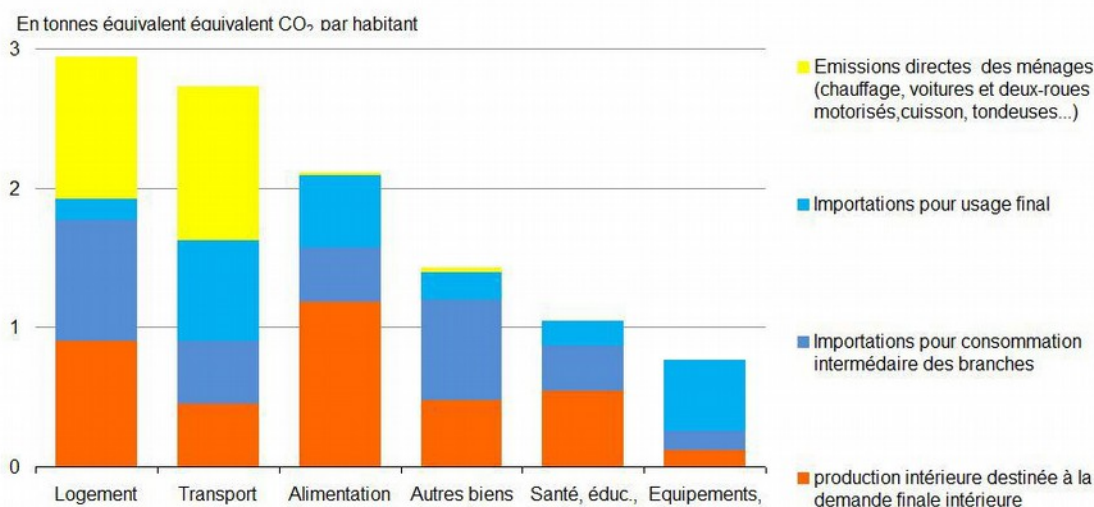


Sources : calculs SOeS d'après AIE, Citepa, Douanes, Eurostat, Insee

Émissions de GES de la France selon l'approche territoire et l'approche empreinte – source, chiffres clés du climat France et monde, édition 2016, DGE, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_du_climat_2016.pdf

Si l'on se focalise sur le secteur du bâtiment, les données sont parcellaires, par exemple :

Décomposition de l'empreinte carbone des Français par grands postes de consommation - année 2010



Sources : SOeS, calculs d'après Citepa ; Insee ; Douanes ; Eurostat ; AIE, 2015. Traitements : SOeS, 2015.

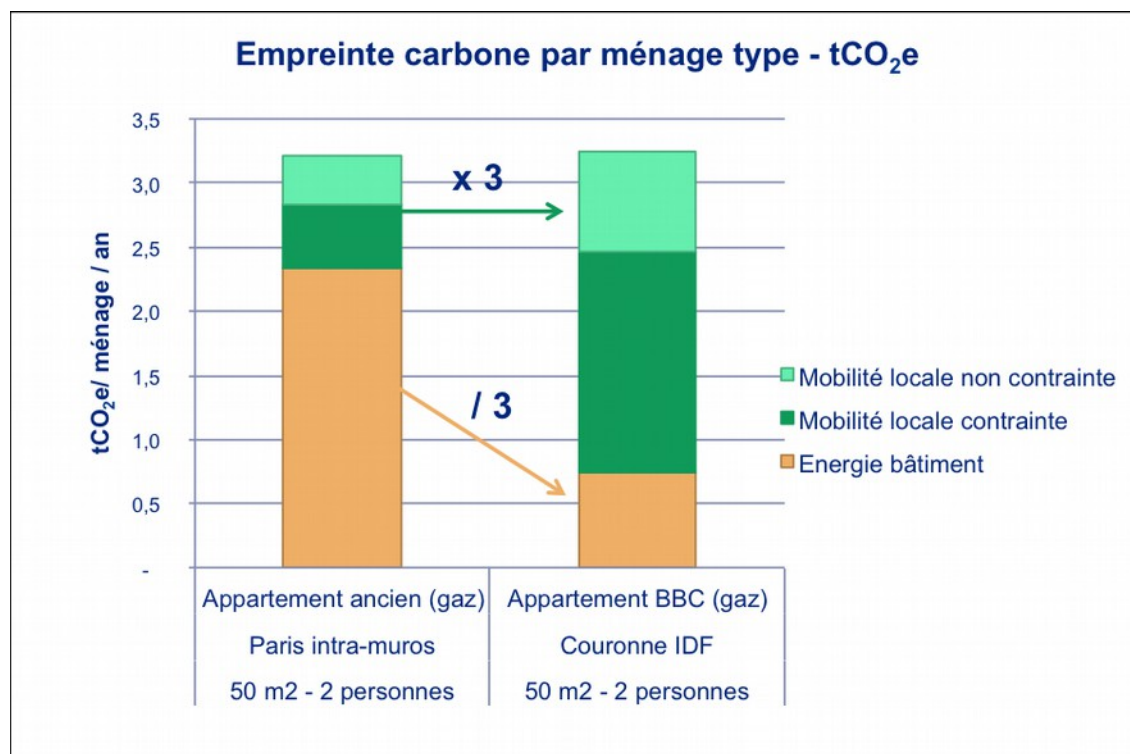
Source, Ministère en charge de l'environnement, CGDD/SOeS,
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/L_essentiel_sur/Energies_et_climat/Empreinte_carbone/2015/empreinte-carbone1c1.jpg

L'empreinte du logement dépasse apparemment aussi de moitié les émissions territoriales associées³⁴, ce qui est dans la moyenne française. Un ordre de grandeur de cette empreinte est environ 3 tCO₂eq/habitant soit entre un tiers et un quart de l'empreinte totale par habitant.

La part de l'empreinte carbone dans le logement est par contre moindre que dans le secteur des transports.

1.1.3. Interdépendance des émissions

En matière d'émission et d'empreinte, les secteurs ne sont cependant pas indépendants : par exemple la localisation d'un logement induit pour son propriétaire des transports plus ou moins important, comme le montre par exemple le graphique suivant examinant l'empreinte carbone (territoriale) d'un ménage (le terme « empreinte » est ici à prendre au sens d' « impact »).



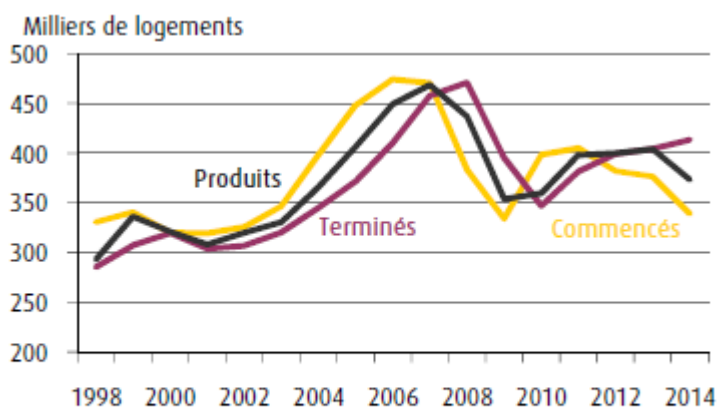
Source ; Carbone 4, <http://www.carbone4.com/sites/default/files/Empreinte%20carbone%20me%CC%81nage.png>

Ainsi les impacts et émissions carbone peuvent être affectés à un secteur ou à un autre avec de bonnes raisons. Ce sujet compliqué, qui vaut aussi pour d'autres secteurs, n'est pas approfondi plus avant pour des raisons de cohérence de présentation.

³⁴ http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/L_essentiel_sur/Energies_et_climat/Empreinte_carbone/2015/empreinte-carbone1c1.jpg

1.1.4. Un tassement conjoncturel de la construction neuve

Une construction nouvelle augmente les émissions nationales globales sauf si , sauf si elle est de type passif ou à énergie positive ou si elle remplace un logement moins performant. En raison de ses meilleures performances énergétiques que la moyenne du parc, elle améliore par contre la performance moyenne du parc. En 2014, selon les comptes du logement les plus récents³⁵, la production de logements neufs est en retrait par rapport à la situation de 2011 même si la tendance des logements achevés est haussière :



Source : SOeS, estimation à partir de Sit@del2 (base au 30/10/15)

Nombre de logements commencés, terminés et produits – Source, Comptes du logement 2015, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Referenc es/2016/compte-logement-2014-references-fevrier-2016.pdf

On est loin de l' « objectif 500 000 » logements neufs produits par an, dont 150 000 HLM, ambitionné en 2012.

1.1.5. Les performances énergétiques et en termes d'émissions des logements neufs

La construction de nouveaux logements, en BBC (bâtiment basse consommation) et/ou en respect de la RT 2012 (réglementation thermique 2012) diminue les consommations moyennes au m² mais accroît les consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre puisque elle accroît le parc de logements consommateurs. Cependant elle permet de donner un marché aux innovations techniques nécessitées par ces nouvelles normes, en vue de les généraliser ensuite dans l'existant. Par ailleurs, si les nouvelles orientations annoncées en juillet 2016, vers des logements « BEPOS + carbone » se traduisent dans la pratique (et d'abord, par une nouvelle réglementation environnementale dès 2018), alors, les nouvelles constructions (produisant plus d'énergie qu'elles n'en consomment) permettront un gain en valeur absolue, et non plus seulement relative.

³⁵ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2547/752/compte-logement-2014-premiers-resultats-2015.html>

Le programme de suivi PREBAT³⁶, mis en œuvre par le CEREMA³⁷, cherche à mesurer les performances réelles de bâtiments performants, démonstrateurs à basse consommateur d'énergie. Son bilan 2015³⁸ souligne le poids des postes non réglementés, qui représentent entre 50 et 90 kWh/m²/an. À titre de comparaison, la consommation totale des cinq postes réglementés de la RT 2012³⁹ (chauffage, rafraîchissement, production d'eau chaude sanitaire alias ECS, éclairage, et auxiliaires -de chauffage, rafraîchissement, ECS et ventilation) représente typiquement pour les bâtiments performants étudiés :

- 50 à 90 kWh E_{primaire}/m²/an pour les bureaux ;
- 70 à 170 kWh E_{primaire}/m²/an pour les autres bâtiments tertiaires ;
- 70 à 110 kWh E_{primaire}/m²/an en habitat collectif ;
- 40 à 80 kWh E_{primaire}/m²/an en habitat individuel

Ces performances sont dans la classe énergétique A ou B⁴⁰.

De tels bâtiments très performants sont encore peu représentatifs du parc existant, mais sont plus représentatifs des bâtiments récemment construits.

Ainsi, en France, selon des données issues de diagnostics de performance énergétique (DPE) et sous réserve de la fiabilité desdits DPE, la classe des logements construits avant 2013 est majoritairement D ou E, mais elle est B ou A pour les logements construits après 2013.

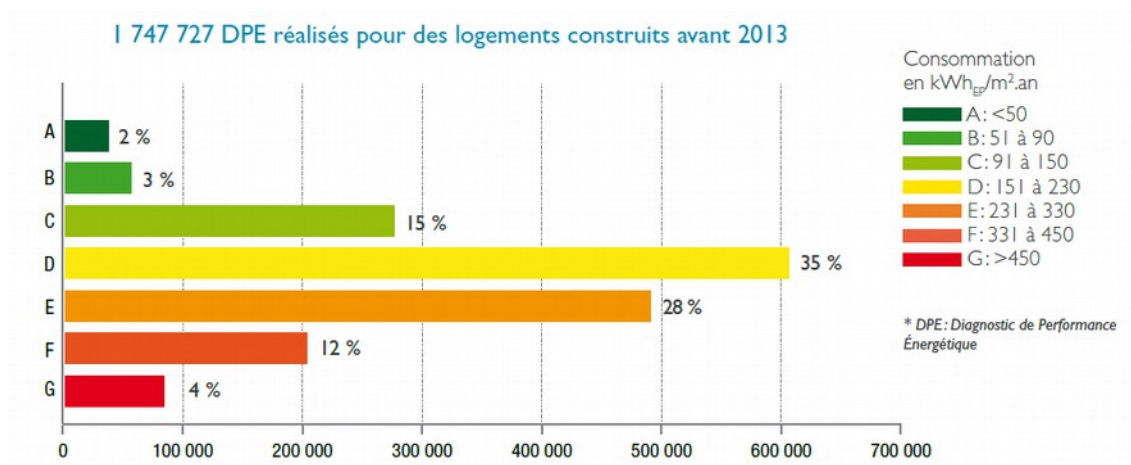
³⁶ Programme national de Recherche et d'expérimentation sur l'Énergie dans les bâtiments lancé en 2005 en France

³⁷ Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, créé en 2014 par regroupement de plusieurs composantes du réseau scientifique et technique du ministère en charge de l'équipement et de l'environnement

³⁸ http://catalogueuse/catalog/product/view/id/1792/s/batiments-demonstrateurs-a-basse-consommation-d-energie-prebat-synthese/?__SID=U&link=4046

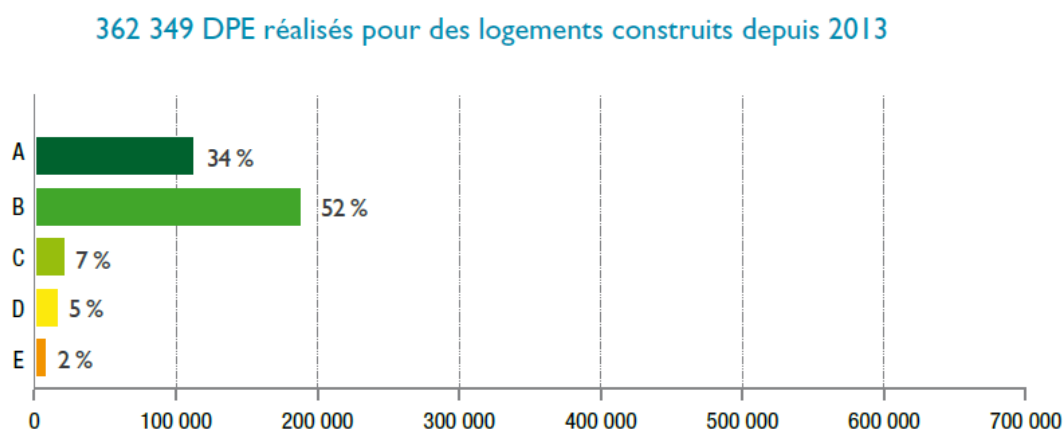
³⁹ RT : réglementation thermique

⁴⁰ Pour mémoire les classes énergétiques quantifient la consommation d'énergie primaire par m² et par an pour les « postes réglementaires » à savoir chauffage, rafraîchissement, production d'eau chaude sanitaire alias ECS, éclairage, et auxiliaires -de chauffage, rafraîchissement, ECS et ventilation. La classe d'étiquette énergétique A, la meilleure, indique moins de 50 kWhEp/m²/an. La classe B va de 51 à 90, la classe C de 91 à 150, la classe D de 151 à 230, la classe E de 231 à 330, la classe F de 331 à 450 et la classe G, la plus mauvaise, au delà de 451 kWhEp/m²/an. Voir infra et aussi <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Diagnostic-de-Performance,855-.html>



Performance énergétique du parc de logements construits avant 2013 au regard des DPE collectés – Source, les chiffres clés 2015 climat air énergie, ADEME, p. 61

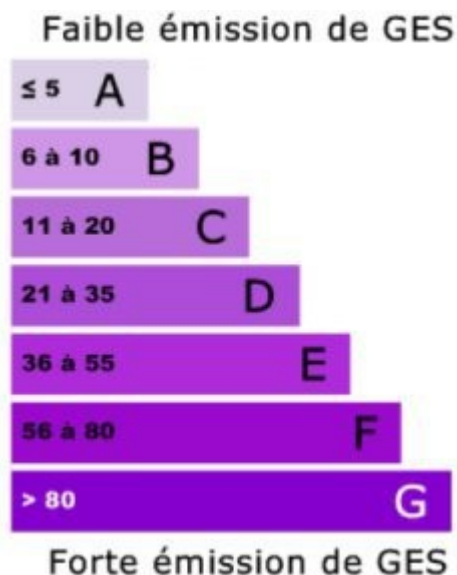
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>



Performance énergétique du parc de logements construits depuis 2013 au regard des DPE collectés – Source, les chiffres clés 2015 climat air énergie, ADEME, p. 61

<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

L'énergie représente l'essentiel des émissions des bâtiments. Il existe aussi des classes d'émission des bâtiments, libellés en kgCO₂eq/m².an.



Classes d'émission de GES des bâtiments, en kgCO₂eq/m²:an. - Source, <http://www.vente-location-credit-immobilier.com/comprendre-la-classe-energie-et-ges/>

Ces échelles ne concernent que les consommations et émissions instantanées, et non pas celles liées aux étapes de construction et de déconstruction incluses dans le cycle de vie. La RT 2012 (voir *infra*) est en cours de révision pour aboutir, vers 2018, à une nouvelle réglementation « environnementale », incluant consommations et contenu carbone et prenant en compte le cycle de vie.

1.1.6. Une situation mitigée en matière de rénovation

Le logement neuf, on l'a vu, a de bonnes performances thermiques et . L'essentiel du problème à résoudre en matière de consommations et d'émissions est dans le parc existant, et la seconde piste naturelle d'amélioration susmentionnée est donc la rénovation, pour un parc dont l'étiquette énergétique, en moyenne et en mode, se situe autour des classes D et E. La rénovation des bâtiments se situant en classe F et G a été affichée comme prioritaire⁴¹.

Le président de la République a en 2012 fixé comme objectif de mettre aux normes thermiques et écologiques 500 000 logements par an d'ici à 2017 (380 000 logements privés et 120 000 logements sociaux). Cet objectif a motivé le plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH)⁴², présenté le 21 mars 2013, et visant à enclencher la décision de rénovation des particuliers par l'accompagnement et le conseil, financer la rénovation au moyen d'aides et d'outils (eco-prêt à taux zéro alias éco-PTZ, crédit d'impôt transition énergétique alias CITE) et mobiliser les professionnels sur la garantie de qualité.

⁴¹ Voir par exemple article 5 de la LTECV : « avant 2025, tous les bâtiments privés résidentiels dont la consommation en énergie primaire est supérieure à 330 kilowattheures d'énergie primaire par mètre carré et par an doivent avoir fait l'objet d'une rénovation énergétique ».

⁴² <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-plan-de-renovation-energetique,34149.html>

1.1.6.1. Pour les logements privés hors logement social, la rénovation thermique marque le pas

En matière de logement privé (hors logement social), l'objectif à terme est de 380 000 rénovations performantes par an en 2017. Force est de constater en 2016 que la rénovation thermique marque le pas ces dernières années.

L'observatoire permanent de l'amélioration énergétique des bâtiments (OPEN) de l'ADEME, dans son rapport de Campagne 2015⁴³, indique que plus de 3,5 millions de rénovations de logements ont été achevées en 2014 pour un total de 35 Md€ tous types de travaux confondus, mais seulement 288 000 sont des rénovations énergétiques « performantes » ou « très performantes ». « Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)⁴⁴, 288 000 logements privés ont, en 2014, fait l'objet de travaux de rénovation énergétique, pour un coût moyen des travaux de 25 410 euros et un coût total de 7,3 Mds €. C'est un bilan mitigé, loin des objectifs initiaux. Convaincre les 6 millions de copropriétaires de se lancer dans des travaux est une tâche particulièrement ardue. ».⁴⁵ Ces chiffres, pour rappel, ne couvrent que le logement privé et non le logement social.

Parmi les logements privés susmentionnés, se trouvent les logements ayant bénéficié d'une aide de l'agence nationale pour l'amélioration de l'habitat (ANAH) qui aide propriétaires occupants ou bailleurs. Les chiffres clés de l'ANAH pour 2015⁴⁶ indiquent qu'environ 50 000 logements ont été rénovés avec les aides du FART (Fonds d'Aide à la Rénovation Thermique⁴⁷). La ministre en charge du logement a annoncé en septembre 2016 son souhait de voir porter l'objectif annuel de l'ANAH à au moins 70 000 logements rénovés.

➤ LA LUTTE CONTRE LA PRÉCARITÉ ÉNERGÉTIQUE – PROGRAMME HABITER MIEUX

PROFIL DES PROPRIÉTAIRES	Nombre de logements	Montant des aides Anah (en M€)	Montant des primes Fart (en M€)	Montant total (en M€)	Aide totale moyenne par logement (en €)
Propriétaires occupants	43 710	311,7	114,1	425,8	9 742
Propriétaires bailleurs	3 791	60,6	6,9	67,6	17 824
Syndicats de copropriétaires	2 205	20,1	3,4	23,6	10 692
TOTAL	49 706	392,4	124,5	517	10 400

Dans les subventions du Fonds d'aide à la rénovation thermique, on peut ajouter à ces chiffres 15,6 millions d'euros de soutien à l'ingénierie.

- Comme en 2014, le programme Habiter Mieux maintient sa dynamique à hauteur de près de 50 000 logements financés. La lutte contre la précarité énergétique représente près de 85 % des aides aux travaux accordées par l'Anah en 2015.

⁴³ Campagne 2015 OPEN, janvier 2016, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

⁴⁴ Voir l'observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement (OPEN) http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

⁴⁵ Cite: Le Monde, juillet 2016, http://www.lemonde.fr/economie/article/2016/07/05/le-laborieux-chantier-de-la-renovation-energetique_4964019_3234.html

⁴⁶ Voir <http://www.anah.fr/qui-sommes-nous/chiffres-cles-2015/>

⁴⁷ Le Fart permet de verser la prime d'État dans le cadre d'Habiter Mieux, dès lors que les travaux de rénovation énergétique permettent un gain de consommation énergétique d'au moins 25 %.

Nombre de logements rénovés avec l'aide de l'ANAH – source, Chiffres clés 2015 de l'ANAH, <http://www.anah.fr/qui-sommes-nous/chiffres-cles-2015>

Les gains obtenus par ce programme « habiter mieux » sont (chiffres de 2013) d'environ 38 % (voir aussi *infra*), supérieurs aux 25 % requis pour obtenir des aides.⁴⁸



Evaluation énergétique des logements aidés avant et après travaux. Source : ANAH, Chiffres 2013

Évaluation de la classe énergétique des logements aidés avant et après travaux – Source, « Amélioration de la performance énergétique des logements : habiter mieux, aider plus, dépenser moins... », PUCA et PREBAT, <http://www.ademe.fr/amelioration-performance-energetique-logements-habiter-mieux-aider-plus-depenser-moins>

Les enquêtes OPEN de l'ADEME⁴⁹ fournissent aussi des éléments sur les travaux achevés (avec trois niveaux de « gestes », quatre niveaux de rénovation, et cinq postes de travaux : chauffage, eau chaude sanitaire, fenêtres, murs, toitures-combles), les opérations effectuées, les coûts des chantiers associés, voire les classes énergétiques de départ.

Le plan bâtiment durable a agrégé ces données et d'autres (notamment issues des CERC: cellules économiques régionales de la construction) pour publier des tableaux de bord synthétiques⁵⁰ présentant 28 indicateurs relatifs aux émissions de GES, consommations énergétiques du parc neuf, rénovation et consommation du parc existant, usage des EnR, formations et emplois. Il récapitule entre autres les recours au CIDD, aux Eco-PTZ, aux éco-PLS, ainsi que les résultats des enquêtes OPEN et notamment le nombre de rénovations performantes, ventilées par postes de travaux :

		2006		2008		2010		2011		2013		2014	
Nombre de rénovations finalisées "3 étoiles" et "performantes"													
		209 000		265 000		295 000				265 000		288 000	
Marchés (Mds€ et nb logements) :													
entretien-amélioration	40	9 110 000	41	7 380 000	39	6 430 000	39	7 694 000	40	9 734 000	-	-	
travaux OPEN	21	4 890 000	22	3 885 000	19	3 375 000	-	-	17	4 485 000	35	3 505 000	
avec impact énergétique	13	2 520 000	15	2 360 000	14	2 385 000	14	2 533 000	13	2 597 000	-	-	
Postes de travaux ayant un impact énergétique (Mds€ et part des travaux principaux) :													
Fenêtres	5,9	46%	6,0	40%	5,9	42%	5,5	41%	5,2	41%	6,3	25%	
Chauffage	3,9	31%	5,5	36%	4,0	28%	3,5	26%	3,3	26%	6,8	27%	
Murs	1,6	13%	2,3	16%	3,2	22%	3,2	24%	2,8	22%	5,4	21%	
Toiture	1,3	11%	1,3	9%	1,2	8%	1,3	9%	1,5	12%	6,8	27%	

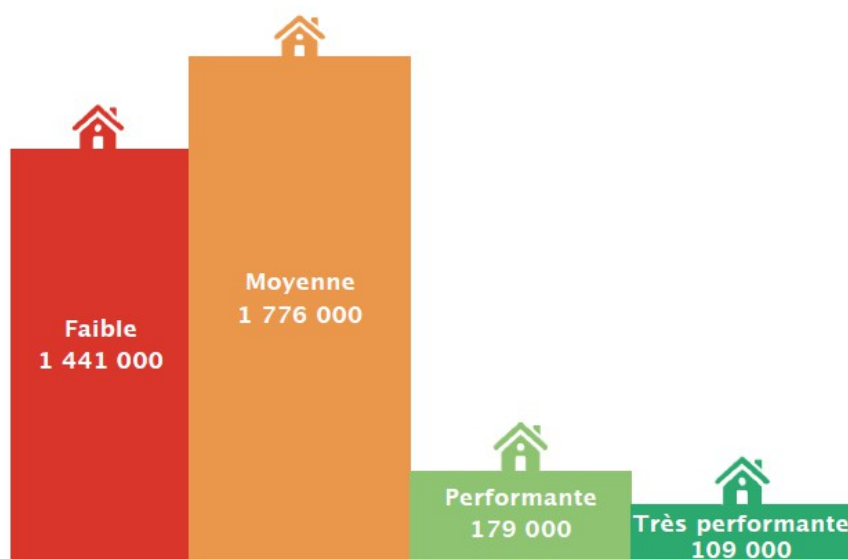
Source : ADEME, OPEN

⁴⁹ http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

⁵⁰ http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_pbd_2016_donnees_2014_vf.pdf,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_2014.pdf,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_VF.pdf

Évolution du nombre de rénovations performantes, marchés et postes de travaux de 2006 à 2014 - Source, « Tableau de bord du plan bâtiment durable », novembre 2016, données au 31/12/2014,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_pbd_2016_donnees_2014_vf.pdf

Les rénovations « performantes »⁵¹ et « très performantes »⁵² sont en minorité, et leur somme en 2014 atteint 288 000 sur un total de 3 505 000 soit 8 %.



Source : ADEME, OPEN

Nombre et niveau des rénovations effectuées par les particuliers, achevées en 2014 - Source, « Tableau de bord du plan bâtiment durable », novembre 2016, données au 31/12/2014,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_pbd_2016_donnees_2014_vf.pdf

Il convient de remarquer que cette classification des rénovations a changé à la dernière enquête OPEN (campagne 2015)., ce qui ne facilite pas le suivi des progrès. En effet, la précédente campagne classait les rénovations selon un barème d'efficacité énergétique « trois étoiles » (trois interventions performantes, à savoir de niveau « médium » ou « optimum »), deux étoiles (travaux partiels) ou une étoile (performance énergétique non prise en compte). En 2013 265 000 rénovations « trois étoiles » ont été finalisées.

Elles ne sont pas directement comparables, même si les 288 000 rénovations susmentionnées de 2014 ont eu un coût moyen de 25 410€TTC contre 19 600€ TTC en moyenne pour les rénovations 265 000 « 3 étoiles » susmentionnées de 2013.

Les consommations unitaires décroissent aussi lentement dans le secteur résidentiel. De manière générale le poste chauffage décroît, le poste eau chaude reste stable, le poste électricité augmente.

⁵¹ deux gestes performants parmi les 5 postes (fenêtres, murs, toiture, chauffage, eau chaude sanitaire). Les trois autres postes sont soit sans action, soit de niveau faible

⁵² au moins deux gestes performants et au moins un geste moyen sur l'un des trois postes restant

Usages	Consommations unitaires							Variation annuelle moyenne (%/an)		Evolution (%)
	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2013	2000-2013	2005-2013	2005-2013
kWhEF/m².an										
Tous usages	238	235	221	209	192	182	179	-1,6%	-1,9%	-14%
Chauffage + ECS	205	199	184	169	151	141	139	-2,1%	-2,4%	-18%
kWhEP/m².an										
Tous usages	271	271	262	254	239	229	226	-1,1%	-1,4%	-11%
Chauffage + ECS	235	232	214	199	184	174	172	-1,7%	-1,8%	-14%

Source : Calcul CSTB à partir de CEREN, Données statistiques d'octobre 2015 (climat normal)

Évolution 1990-2013 des consommations d'énergie par m² dans le résidentiel -
Source, « Tableau de bord du plan bâtiment durable », novembre 2016,
données au 31/12/2014,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_pbd_2016_donnees_2014_vf.pdf

Une version antérieure du tableau de bord du Plan Bâtiment Durable ⁵³ fournit aussi des indications sur les gains énergétiques consécutifs aux opérations de l'ANAH susmentionnées.

Programme Habiter mieux (précarité énergétique)	2011	2012	2013	
- Nb de logements aidés	6 669	12 786	31 235 dont 1 555 logements en copropriétés dégradées*	
			Propriétaires occupants	Propriétaires bailleurs
			27 530	2 150
- Total subventions (M€/ANAH + Etat)	34	73	331,5	
			278,36	46,18
Montant moyen de l'aide	5 098	5 709	9 943 €	21 482 €
- Montant moyen des travaux	Avec Habitat indigne et très dégradé : 17 837 €	Avec Habitat indigne et très dégradé : 17 584 €	Avec habitat indigne et très dégradé : 17 791 €	Avec Habitat indigne et très dégradé : 17 584 €
	Hors habitat indigne et très dégradé : 14 279 €	Hors habitat indigne et très dégradé : 14 419 €	Hors habitat indigne et très dégradé : 15 715 €	Hors habitat indigne et très dégradé : 14 419 €
- Gain énergétique moyen	39 %	38 %	39 %	64 %

Source : ANAH
* Le détail des logements en copropriétés dégradées n'apparaît pas dans le tableau.

Nombre de logements aidés par le programme « Habiter mieux » de l'ANAH –
Source, « Tableau de bord du plan bâtiment durable », novembre 2014,
données au 31/12/2013,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_2014.pdf

⁵³ « Tableau de bord du plan bâtiment durable », novembre 2014, données au 31/12/2013, http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_2014.pdf

Des tableaux de bord régionaux de la construction durable, élaborés par des cellules économiques régionales de la construction (CERC), sont aussi disponibles, selon des formats et des fréquences diverses⁵⁴.

Enfin des éléments de gains unitaires sont aussi disponibles dans l'exercice « Scénarios Prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 »⁵⁵, piloté par la DGEC et en date de septembre 2015 :

Geste de rénovation	Gestes types « références »		Gains unitaires					
			Maison individuelle < 1975	Maison individuelle > 1975	Logements coll. < 1975	Logements coll. > 1975	HLM < 1975	HLM > 1975
Modéré	Fenêtres	Double vitrage 4/16 (argon)/4 peu émissif - Menuiserie PVC - Uw=1,4	9%	11%	14%	15%	13%	16%
Intermédiaire	Fenêtres	Double vitrage 4/16 (argon)/4 peu émissif - Menuiserie PVC - Uw=1,4	39%	36%	43%	33%	40%	33%
	Murs	ITI - 15 cm - R = 4,7						
Fort	Fenêtres	Double vitrage 4/16 (argon)/4 peu émissif - Menuiserie PVC - Uw=1,4	74%	63%	71%	43%	71%	42%
	Murs	ITE - 20 cm - R = 5,5						
	Toit	Isolation combles aménagés - 20 cm - R = 6						
	Ventilation	Ventilation mécanique hygro B						

Source : *Energies Demain*

Rénovations types et gains unitaires par type de logement – source, Energies Demain dans « Scénarios Prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 », p 72, , DGEC, et al, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

Ces derniers éléments confirment l'utilité d'une rénovation a minima de niveau intermédiaire, avec une approche d'ensemble préférable à un geste isolé.

À ce stade cependant, et en dehors des éléments précités, la mission ne considère pas disposer de suffisamment de données précises sur les gains obtenus. De telles données sont d'ailleurs sans doute difficiles à obtenir, en raison d'une connaissance plus ou moins bonne des conditions avant et après travaux, des écarts entre convention et pratique, des qualités de mises en œuvre différentes, de l'effet rebond, etc.

Toujours sur le secteur résidentiel, la Cour des Comptes, dans son rapport relatif à l'impact budgétaire et fiscal du Grenelle Environnement (novembre 2011) créditait les deux mesures phares du dispositif d'incitation – le prêt à taux zéro (éco-PTZ) et le Crédit d'Impôt Développement Durable (CIDD) – d'un impact significatif sur les émissions de gaz à effet de serre « théoriques » : une réduction de 7,5 % en deux ans⁵⁶. Mais elle déplorait leur insuffisance – « *tels qu'ils sont aujourd'hui calibrés et malgré leur coût élevé de 1,78 Md €* » – pour atteindre l'objectif de réduction de 38 % de la consommation d'énergie.

⁵⁴ http://www.cellule-eco-bretagne.asso.fr/rc/fr/cellule-eco-bretagne.asso/htm/Article/2012/20120724-142440-792/src/htm_fullText/fr/TdBCDBretagne2015.pdf, http://www.crcbtp.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_de_la_construction_durable_en_midi-pyrenees_no3.pdf... Voir aussi rapport CGEDD n° 008370-01 « Audit thématique sur les dispositifs de recueil de données sur l'efficacité énergétique des bâtiments (logements et locaux tertiaires). », mars 2013

⁵⁵ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

⁵⁶ Éléments du rapport de 2013, mais le rapport précité du SOeS (juillet 2012) donne les chiffres suivants pour les émissions de CO₂ du secteur résidentiel 2009 : 70 Mt, 2010 : 66 Mt, 2011 : 68 Mt.

En matière de logements privés, plus précisément, les inquiétudes s'aggravaient en 2012, avec un quasi tarissement de la distribution des Éco-PTZ (éco-prêts à taux zéro) et un retard préoccupant du démarrage du programme « habiter mieux » de lutte contre la précarité énergétique, pourtant bien doté. Certes de nombreuses mesures techniques ont été proposées pour pallier les difficultés rencontrées.

Aujourd'hui (2016), l'Éco-PTZ a été relancé par la loi de finances rectificative 2014 qui décharge notamment les banques de leur rôle de contrôle technique pour l'octroi des prêts. Il a été prolongé jusqu'au 31 décembre 2018 et les conditions d'éligibilité ont été simplifiées et harmonisées avec le CITE (voir ci-après). Le CIDD (crédit d'impôt développement durable) a été remplacé en septembre 2014 par le CITE (Crédit d'impôt transition énergétique), simplifié avec un taux de 30 % sans condition de ressources, et prolongé jusqu'au 31 décembre 2016 par la loi de finances 2016 et inscrit à l'identique dans la loi de finances 2017. La condition de ressources autorisant le cumul du CITE et de l'Éco-PTZ a été supprimée au 1^{er} mars 2016. L'octroi des soutiens est conditionnelle : la qualification « reconnu garant pour l'environnement » (RGE) est requise du professionnel chargé des travaux. Le taux de TVA est fixé à 5,5 % pour les travaux visant l'amélioration de la performance énergétique dans l'habitat. L'Éco-PLS (éco-prêt logement social) soutient les bailleurs sociaux dans leurs opérations de rénovation de leur parc. Enfin les CEE -certificats d'économie d'énergie- (voir *infra*) sont un instrument important d'incitation à la rénovation et ont désormais (sur la période 2015-2018, dite « troisième période ») un volet dévolu à la précarité énergétique.

La rénovation de l'existant doit donc rebondir. Des mesures viennent en appui de ce sursaut souhaité et nécessaire mais sont encore insuffisantes.

1.1.6.2. Rénovation des logements sociaux : une situation plus favorable

La situation est meilleure du côté du logement social, où certes l'exercice de la maîtrise d'ouvrage est plus facile qu'en copropriété. Il semble en effet que la mise en place de prêts bonifiés ait permis le respect de l'objectif de lancement en deux ans de la rénovation de 100 000 premiers logements. En 2014, 105 000 logements ont fait l'objet de rénovation par les bailleurs sociaux⁵⁷, entraînant un changement de classe énergétique pour les 2/3 d'entre eux⁵⁸. La ministre du logement a annoncé en septembre 2016 souhaiter passer à un objectif de 120 000 logements sociaux rénovés énergétiquement par an dès 2017, ce qui est un rappel des objectifs présidentiels de 2012 (voir plus haut).

Les gains moyens ressortent à 145 kWh/m²/an selon une note de la Caisse des Dépôts⁵⁹, faisant typiquement passer un logement de la classe E à la classe C pour un coût de 37 k€/logement dont environ 10k€ pour les travaux liés à l'amélioration énergétique.

⁵⁷ Source : <http://www.semainehlm.fr/nous-les-hlm/les-hlm-en-chiffres-0> cite 125 000 réhabilitations en 2014, <http://www.union-habitat.org/le-mag/rep%C3%A8res/les-hlm-en-10-chiffres> en cite 105 000.

⁵⁸ Source : rapport de l'OPEN http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

⁵⁹ http://ressourceshlm.union-habitat.org/ush/download/Documents/L%27investissement+des+organismes+Hlm+dans+la+r%C3%A9novation+%C3%A9nerg%C3%A9tique+-++note+de+synth%C3%A8se/Note-de-synthese-REF3_8p.pdf

Répartition des gains énergétiques unitaires par étiquette DPE (kWh/m² SH)

Etiquettes	A	B	C	D	E	F	G
Départ	-	-	-	98	149	262	321
Arrivée	207	146	144	147			

Source : http://ressourceshlm.union-habitat.org/ush/download/Documents/L%27investissement+des+organismes+Hlm+dans+la+r%C3%A9novation+%C3%A9nerg%C3%A9tique+--+note+de+synth%C3%A8se/Note-de-synthese-REF3_8p.pdf

Dans le domaine des copropriétés, les engagements sont quasi inexistants, du fait en particulier des difficultés de prises de décision. Dans le cadre des mesures annoncées par la ministre en charge du logement en juillet 2016, on peut noter la décision de confier une mission nouvelle en ce domaine à l'ANAH.

1.1.6.3. Rénovation dans le tertiaire

Peu de données existent sur l'évolution de la situation des bâtiments tertiaires. Dans le cadre des travaux du Plan bâtiment durable⁶⁰, le CSTB a publié des tableaux de bord synthétiques présentés *infra*. Par exemple pour le tertiaire :

Usages	Consommations unitaires						Evolution annuelle moyenne (%/an)		Evolution (%)
	1990	2000	2005	2010	2012	2013	2000-2013	2005-2013	2005-2013
kWhEF/m².an									
Tous usages	263	264	255	246	240	237	-0,8%	-0,9%	-7%
Chauffage	152	143	130	119	114	112	-1,9%	-1,9%	-14%
kWhEP/m².an									
Tous usages	412	427	425	421	415	413	-0,3%	-0,4%	-3%
Chauffage	182	174	160	150	145	142	-1,6%	-1,5%	-11%

Source : Calcul CSTB à partir de CEREN, Données statistiques d'octobre 2015 (climat normal)

Evolution 1990-2013 des consommations d'énergie par m² dans le tertiaire -

Source, « Tableau de bord du plan bâtiment durable », novembre 2016, données au 31/12/2014,

http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_pbd_2016_donnees_2014_vf.pdf

Et pour les bâtiments de l'État (dont un audit a été réalisé entre 2009 et 2011, avec pour les bâtiments audités une consommation de 245 kWhEP/m²shon.an ce qui correspond à une étiquette énergie D) :

⁶⁰ http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/tableau_de_bord_pbd_2016_donnees_2014_vf.pdf

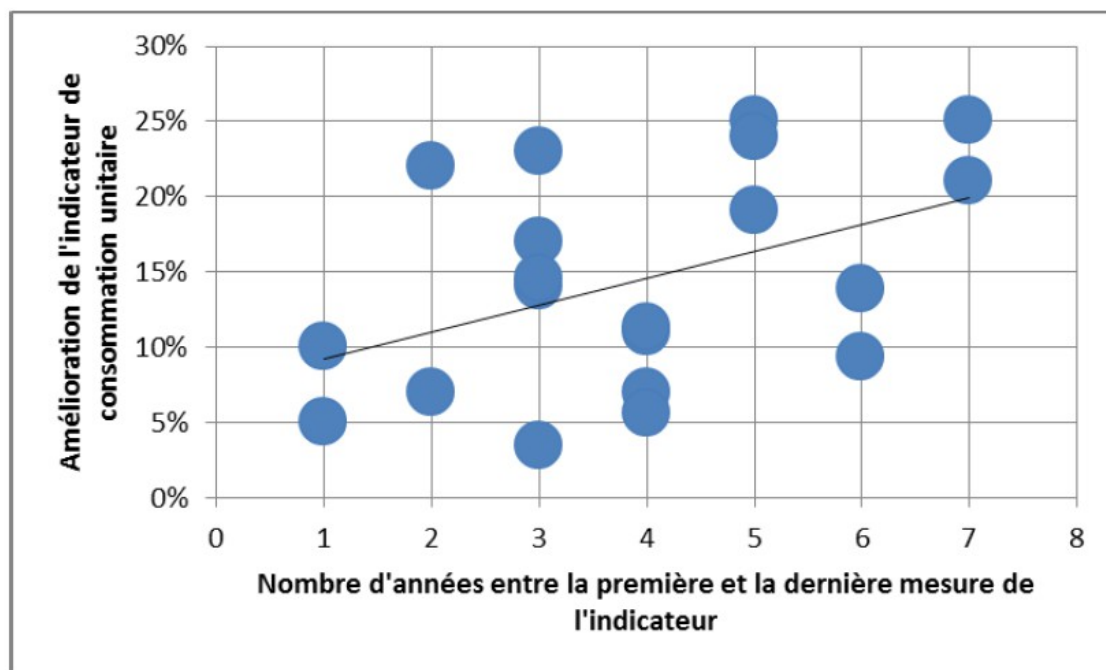
€ constant/agent.an	2009	2010	2011	Evolution 2009-2011
Dépense par agent	524	492	461	-12%

Source : MEDDE CGDD, Bilan des plans pour une administration exemplaire

Évolution des dépenses d'énergie par agent de l'administration centrale de l'État- Source, « Tableau de bord du plan bâtiment durable », novembre 2014, données au 31/12/2013,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_2014.pdf

Une feuille de route relative à la transition énergétique pour les bâtiments de l'État, encore en cours d'élaboration lors de la rédaction de ce rapport, consacre deux recommandations sur huit au diagnostic de l'existant et à la mise en place d'un suivi périodique de la connaissance du parc occupé (voir *infra*).

Récemment le plan bâtiment durable a aussi publié deux rapports sur le suivi de la Charte pour l'efficacité des bâtiments tertiaires publics et privés⁶¹. On y trouve une indication des progrès réalisés par quelques signataires ayant répondu à l'enquête.



Source : <http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-24644-suivi-charte-plan-bat-durable-tertiaire.pdf>

Les améliorations observées sont réduites: entre 2000 et 2013, la surface chauffée tertiaire est passée de 801 Mm² à 948 Mm² soit une augmentation de 18 %⁶²; la consommation d'énergie finale par m² tous usages, elle, a baissé de 10%, aussi grâce aux nouveaux bâtiments tertiaires neufs, et la consommation d'énergie finale (resp. primaire) par m² liée au chauffage a décriu de 22 % (resp.18,5%) ; les améliorations

⁶¹ <http://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-24644-suivi-charte-plan-bat-durable-tertiaire.pdf>

⁶² De manière générale, le rythme annuel d'accroissement des surfaces chauffées tertiaires a été de 1,7 % sur la période 1990-2010 et 1,2 % sur la période 2005-2014

compensent en moyenne l'augmentation des surfaces (par exemple en 2013 les surfaces étaient de 948 Mm² pour une consommation de 19,1 Mtep contre 19,4 Mtep en 2010 pour une surface de 922 Mm²⁶³) mais les consommations d'électricité ont entre temps crû de 41 %, et la consommation d'énergie globale ne décroît guère⁶⁴.

1.1.6.4. Conclusion

En conclusion, la mission constate un certain manque de données précises sur la rénovation, en particulier dans le tertiaire (coûts, mètres carrés traités, efficacité, etc.). Au vu des constats précédents il semble opportun de consolider un dispositif national d'observation, de suivi et comptabilisation de la rénovation, afin de disposer de données précises (notamment en termes de mètres carrés traités, de coûts, de résultats obtenus, essentiellement en termes d'économies d'énergie et de baisse des émissions de carbone, etc.), en particulier dans le secteur tertiaire.

Il convient aussi d'ores et déjà de préciser que les rythmes d'amélioration observés en termes de consommation et d'émissions restent en deçà de ce qui est nécessaire pour atteindre le facteur 4.

1.2. Exercices de prospective récents

La présente section récapitule quelques exercices de prospective et scénarios récents permettant de mettre en contexte les perspectives nationales en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Ces exercices sont souvent volontaristes, parfois normatifs (en ce sens qu'ils considèrent en 2050 l'objectif du facteur 4 atteint et indiquent un chemin pour y parvenir. Ils présentent l'intérêt de mettre en regard mesures prises et impact sur les consommations et émissions.

1.2.1. Le scénario Négawatt de 2011 : sobriété, efficacité

En termes de **prospective**, le **scénario Negawatt**⁶⁵ de 2011, généralement basé sur un triptyque sobriété, efficacité, énergies renouvelables, cible plus particulièrement dans le secteur du bâtiment les enjeux en termes de chaleur. Il *«introduit différents facteurs de sobriété. Il suppose notamment une relative stabilisation du nombre d'habitants par foyer à 2,2 en moyenne, au lieu d'une poursuite du phénomène de décohabitation mesuré par l'INSEE: la différence représente rien moins que 3 millions de logements en 2050. Il prévoit également une stabilisation de la surface moyenne des nouveaux logements, ainsi qu'un développement de l'habitat en petit collectif, et dans le tertiaire un ralentissement sensible de la croissance des surfaces, passant de 930 millions de m² aujourd'hui à 1,2 milliard de m² en 2050, contre 1,5 milliard dans le scénario tendanciel. Les actions d'efficacité se concentrent sur l'amélioration massive des performances énergétiques des bâtiments, à la fois par l'isolation (parois et toiture), et par l'optimisation des systèmes de chauffage. Cette combinaison représente des gisements d'économies d'énergie considérables qu'il est indispensable*

⁶³ <http://multimedia.ademe.fr/catalogues/chiffres-cles-energie-climat-2012/data/catalogue.pdf>

⁶⁴ Par exemple et alternativement, selon les chiffres clés de l'énergie, édition 2015 en date de février 2016 du CGDD http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2016/reperes-chiffres-cles-energie-2015.pdf, la consommation d'énergie finale du tertiaire plafonne à 19,3 Mtep pour 940 Mm² en 2013. Cette surface était de 922 Mm² en 2010

⁶⁵ Voir <http://www.negawatt.org>. Ce scénario a été actualisé fin 2016 et un scénario négaWatt 2017-2050 doit être présenté officiellement le 25 janvier 2017 à Paris.

de mobiliser non seulement dans le neuf, mais surtout dans l'existant. ... Au total, la consommation moyenne en électricité spécifique d'un ménage diminue de 2850 kWh par an en 2010 à environ 1400 kWh par an en 2050 tout en permettant une meilleure satisfaction des besoins. Dans le tertiaire, le scénario aboutit à une baisse de 45% de la consommation d'électricité spécifique par rapport à 2010. »

À l'arrivée, tous vecteurs énergétiques confondus (électricité plus chaleur), le scénario trouve dans le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire ses économies les plus importantes en valeur absolue, avec 400 TWh d'économies en 2050 par rapport au tendanciel soit une réduction de 49 %. Cependant, il faut rappeler ses hypothèses volontaristes en termes de sobriété, supposant par exemple que les ménages vont cesser de diminuer en taille, et que, toutes choses égales d'ailleurs, les surfaces par personne vont s'arrêter de croître contrairement à la tendance habituelle constatée.

1.2.2. Le rapport du comité « trajectoire » de 2011

Le rapport de Perthuis (« Trajectoires 2020 – 2050 vers une économie sobre en carbone: rapport du Comité présidé par Christian de Perthuis », aussi de 2011⁶⁶) considère d'une part l'augmentation des émissions de GES dues à la climatisation, et d'autre part les évolutions en matière de chauffage. Il a « *construit un scénario reposant sur trois principes : les bâtiments neufs construits à partir de 2012 consomment très peu d'énergie de chauffage ; au cours des quarante prochaines années, l'ensemble du parc existant est rénové en profondeur afin que les consommations unitaires approchent celles du parc neuf ; les énergies décarbonées (biomasse et électricité renouvelable) gagnent des parts de marché, à la fois dans les constructions neuves et anciennes, via notamment les réseaux de chaleur.* »

Mais, il pointe les risques comportementaux : « *gare à « l'effet rebond » : s'il suffit de quelques calories apportées par un chauffage électrique ou un téléviseur plasma pour chauffer ces logements très bien isolés, il ne faudrait pas que la climatisation et surtout l'électricité associée aux usages domestiques et bureautiques doublent ou triplent les émissions de ces nouveaux bâtiments performants. Des incitations complémentaires (information, éducation, instrument de pilotage, voire tarification et obligation) devront donc agir sur les usages pour compléter l'action sur l'offre, que ce soit pour les constructions neuves ou les rénovations.* »

Il propose pour le bâtiment les trois trajectoires suivantes : un scénario de référence de stricte application des mesures de politique publique déjà prises (en 2011), un scénario 2 avec un objectif européen de -25 % en 2020 au lieu de -20 %, et un scénario 3 à -30 %. Les points de passage en 2020 sont donc fixés, et l'objectif en 2050 est le facteur 4 tous secteurs confondus. Pour le bâtiment, l'effort est plutôt un facteur six ou sept.

Évolution/1990 (%)	2009	2020	2030	2040	2050
Scénario 1 – Référence	9 %	- 13 %	- 35 %	- 62 %	- 85 %
Scénario 2	9 %	- 22 %	- 43 %	- 64 %	- 85 %
Scénario 3	9 %	- 22 %	- 43 %	- 64 %	- 85 %

Source : travaux du comité

Émissions du secteur résidentiel-tertiaire par rapport au niveau de 1990 – Source, « Trajectoires 2020 – 2050 vers une économie sobre en carbone, Rapport du Comité présidé par Christian de Perthuis »,

⁶⁶ Voir <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/114000655/index.shtml>

1.2.3. La « Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 »⁶⁷

La « Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050 »⁶⁸ avance les évolutions suivantes pour les émissions de gaz à effet de serre :

Mt Co ₂ éq	1990	2030	2050	% 2050/1990
résidentiel	72,4 = 67,2 (combustion) + 5,2 (autres)	27,3 = 20,8 (combustion) + 6,5 (autres)	4,9 = 4,8 (combustion) + 0,1 (autres)	-93,23 %
tertiaire	28,7	9	1,3	-95,47 %

Émission de gaz à effet de serre du secteur bâtiment – Source,
<http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

La contribution du bâtiment s'y établit au niveau d'un facteur 10 ou plus, un peu supérieur au scénario proposé par le rapport de Perthuis.

« Pour réduire les consommations dans ce secteur-clé, l'hypothèse d'un plan ambitieux de construction neuve et de rénovations thermiques des bâtiments résidentiels et tertiaires est retenue pour 2030.

Le nombre de logements neufs construit chaque année s'élève par hypothèse à 350 000. Il semble possible d'atteindre l'équilibre dans la construction neuve de logements collectifs et de maisons individuelles en 2030 (contre 58% de maisons individuelles et 42% de logements collectifs dans la construction neuve aujourd'hui). Ces nouvelles constructions ont vocation à s'inscrire dans une organisation urbaine nécessitant moins de transports et limitant l'artificialisation des sols, toutefois l'organisation urbaine à l'horizon 2030 est déjà largement fixée par le parc actuel. En moyenne, 500 000 logements feraient l'objet de rénovations thermiques par an. ».

En ce qui concerne les équipements, le niveau de confort est inchangé mais les besoins diminuent grâce aux travaux d'isolation et par l'usage de technologies performantes : les pompes à chaleur (PAC) pour le chauffage équipant 20 % du parc en 2030 et ayant un coefficient de performance 4 contre 3 aujourd'hui, les chauffe-eau thermodynamiques (CET) remplaçant les cumulus (chauffe-eau à effet Joule) pour l'eau chaude sanitaire. Pour le tertiaire, les équipements progressent de manière similaire.

À l'horizon « normatif » 2050, « le parc de logements est composé de deux grands types de bâtiment : un parc de bâtiments neufs, de niveau BBC / BEPOS, et un parc de bâtiments rénovés. La consommation du parc de 36 000 000 de logements se répartit alors selon ces deux grandes catégories :

- le parc « ancien rénové » de 27 000 000 de logements construits avant 2020.

- le parc « neuf » de 9 000 000 de logements.

⁶⁷ <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

⁶⁸ <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

La consommation moyenne au mètre carré des logements baisse ainsi de plus de 60% entre 2010 et 2050, passant de 191 kWh/m²/an à 75 kWh/m²/an en énergie finale et pour l'ensemble des usages.

La consommation moyenne liée au chauffage et à l'eau chaude sanitaire diminue fortement grâce aux rénovations thermiques et à la pénétration importante de PAC (50 % du parc), CESI (chauffe-eau solaire individuel, 20 % du parc) et CET (chauffe-eau thermodynamique), les usages spécifiques de l'électricité sont globalement contenus, par contre les consommations de climatisation s'accroissent fortement, ce qui constitue une prise en compte indirecte de l'impact du changement climatique. ». Pour le tertiaire, l'hypothèse pour 2050 envisage une réduction de 20 % des surfaces par employé, une part croissante du télétravail, la rationalisation de l'usage du foncier. L'organisation urbaine est plus fonctionnelle (travail à domicile, télécentres, îlots à énergie positive).

En fin de compte, « Selon le scénario retenu, la consommation moyenne au mètre carré des logements baisse de plus de 60% entre 2010 et 2050 ». Et les émissions de gaz à effet de serre sont divisées par plus de 10, par le biais de l'hypothèse de décarbonation de l'approvisionnement énergétique notamment (électricité 80-85 % renouvelable, réseau de chaleur 100 % renouvelable, réseau de gaz 56 % renouvelable).

1.2.4. Les scénarios du débat national pour la transition énergétique (DNTE)

Quatre trajectoires ont été explicitées et comparées dans un document de synthèse⁶⁹. Il s'agit des trajectoires DEC (substitution des énergies fossiles), DIV (diversité), EFF (efficacité) et SOB (sobriété). Ces trajectoires exploitent certains des scénarios précités : pour mémoire DEC s'inspire des scénarios Negatep, RTE médian, ANCRE ELE et UFE ; DIV s'inspire sur les scénarios ANCRE DIV, RTE nouveau mix, et DGEC AMO ; EFF s'inspire des scénarios ADEME, GRDF, ANCRE Sob et Encilocarb renforcé ; SOB s'inspire des scénarios négaWatt, Greenpeace, WWF et Global Chance.

Le tableau ci-après en résume pour mémoire les principaux résultats pour le secteur du bâtiment, en termes de consommation d'énergie finale.

Consommation d'énergie (Mtep)	DEC	DIV	EFF	SOB
Résidentiel 2010	45	45	45	45
Tertiaire 2010	22	22	22	22
Résidentiel 2030	36	41	30	33
Tertiaire 2030	22	20	18	17
Résidentiel 2050	33	34	19	21
Tertiaire 2050	21	17	15	11

Consommation d'énergie finale selon les quatre scénarios du DNTE en 2030 et 2050 – Source,

⁶⁹ http://www.carbone4.com/download/Etude_Trajectoires_DNTE_C4.pdf

Les émissions sectorielles dépendent du mix énergétique et de son niveau de décarbonation.

1.2.5. Suite du DNTE : les travaux du DDPP de 2015

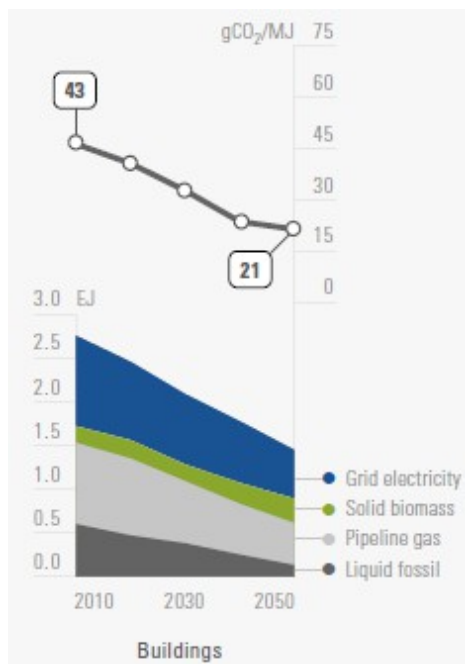
Dans le sillage des travaux précités du débat national pour la transition énergétique (DNTE), les travaux du DDPP (*deep decarbonization pathway project*)⁷⁰ s'attachent à quantifier les effets temporels de mesures diverses dans les scénarios d'émissions. Le travail est fait à l'échelle mondiale, mais propose sur la base des scénarios précités du DNTE une déclinaison pour la France⁷¹. Incidemment est fait le constat d'une certaine similitude entre les orientations de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte en date du 7 août 2015 (LTECV) et le scénario de type EFF⁷², en raison de l'objectif de division par deux de la demande énergétique finale en 2050 par rapport à 2012 (LTECV) ou 2010 (trajectoire EFF). Cet objectif est ambitieux, et en cas d'échec sur ce point d'autres trajectoires doivent être considérées, comportant une moindre réduction de la consommation énergétique mais une plus grande part d'énergie décarbonée. Les travaux du DDPP étudient notamment la possibilité de réorienter la stratégie vers la trajectoire DIV (-20 % de réduction de demande énergétique en 2050 par rapport à 2010, 50 % d'électricité nucléaire après 2025, 40 % de renouvelables dans le mix électrique en 2050), qui elle-même repose notamment sur une nouvelle génération de centrales nucléaires. La conclusion est que la trajectoire EFF reste la plus robuste.

La trajectoire d'émissions rapportées à la consommation du secteur bâtiment dans le « scénario d'efficacité » est :

⁷⁰ <http://deepdecarbonization.org/countries/#france>

⁷¹ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

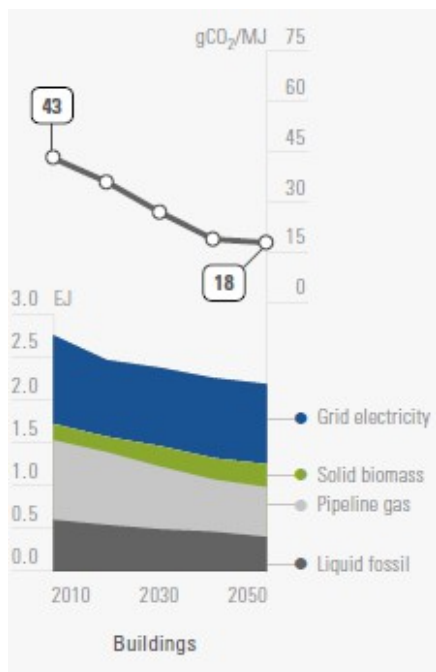
⁷² « La trajectoire EFF, inspirée des scénarios ADEME, GRDF, ANCRE Sob et Encilowcarb renforcé, prévoit une baisse de la demande énergétique importante et une diversification du mix énergétique. A horizon 2030, la trajectoire EFF vise à tirer, de manière ambitieuse mais réaliste, le potentiel maximum des économies d'énergie et des énergies renouvelables. », selon le document « Étude des 4 trajectoires du DNTE », http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf



Évolution des émissions liées aux consommations dans le bâtiment selon le scénario d'efficacité – source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

Cela se traduit, pour ce scénario EFF, par une division par deux des dépenses énergétiques entre 2010 et 2050.

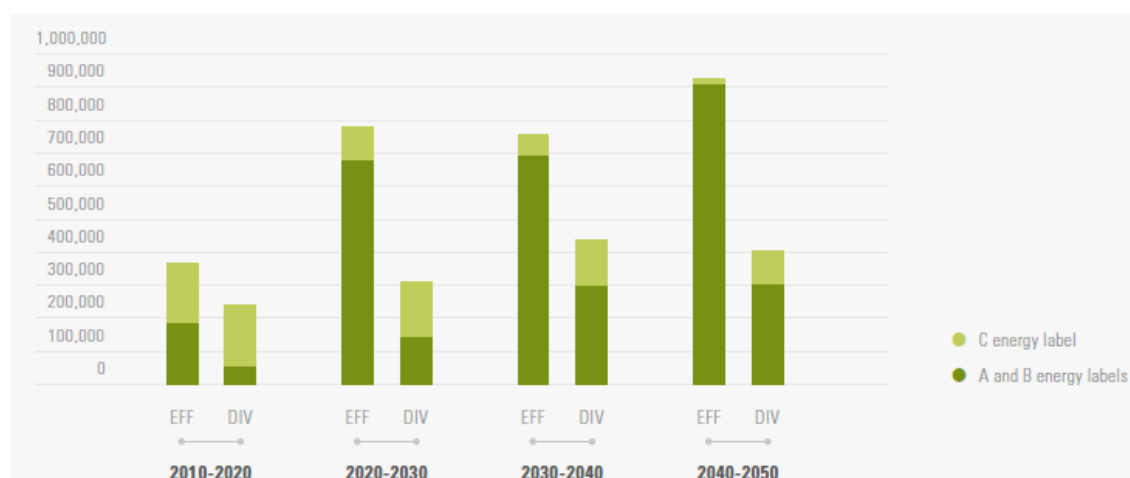
Et la trajectoire d'émissions rapportées à la consommation du secteur bâtiment dans le « scénario de diversité » est :



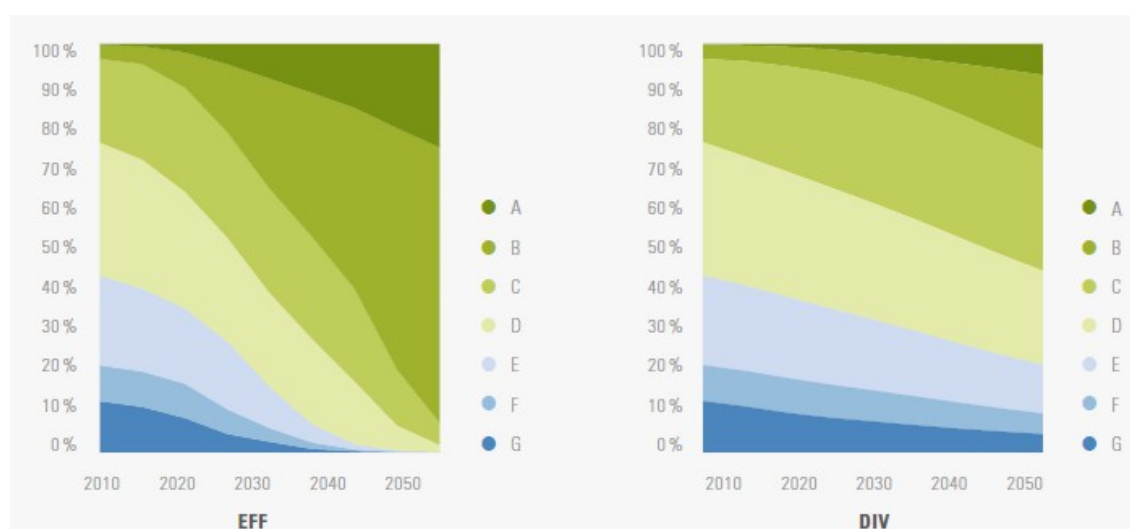
Évolution des émissions liées aux consommations dans le bâtiment selon le scénario de diversité – source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

Cela se traduit, pour ce scénario DIV, par une réduction d'un quart des dépenses énergétiques entre 2010 et 2050.

Les deux scénarios diffèrent par de nombreux autres aspects. En matière de rénovation énergétique, par exemple, l'effort est bien plus important pour EFF que pour DIV.



Nombre de rénovations thermiques par an, ventilé selon la classe énergétique après rénovation – source, http://carbonitruration/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf



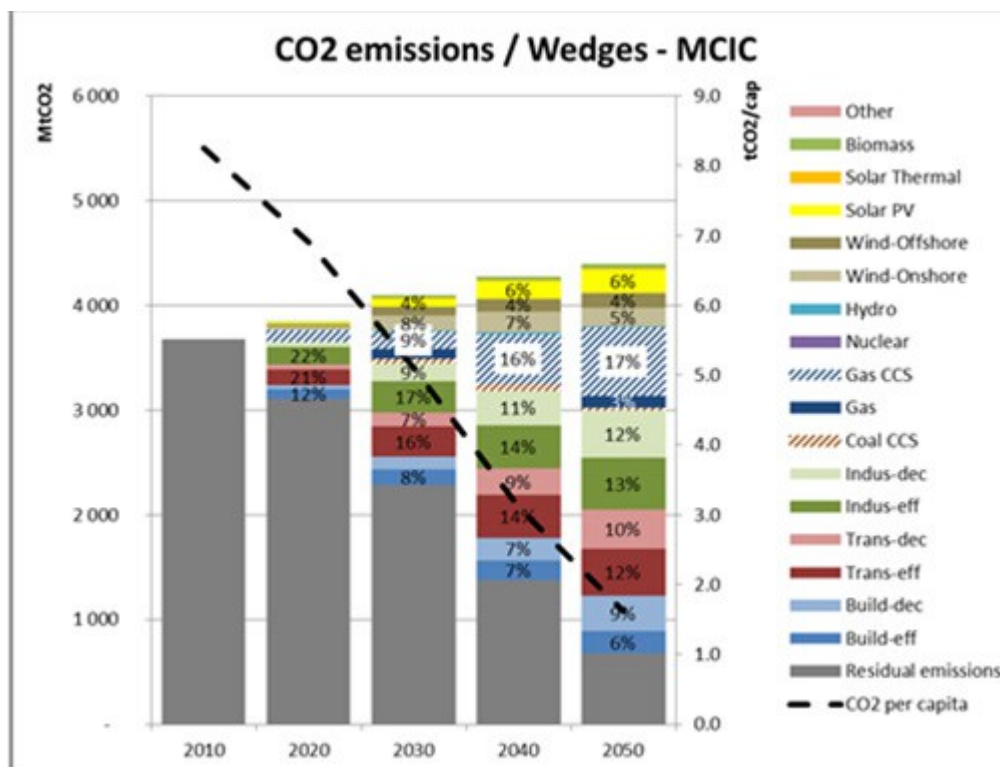
Évolution de la part des labels énergétiques du parc – source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

Sous le scénario EFF, 21 Md m² sont rénovés pour un gain énergétique de 55 %. Sous DIV, 15 Md m² sont rénovés avec un gain en efficacité énergétique de 45 %.

1.2.6. Suite du DNTE et du DDPP : les scénarios de l'ANCRE de 2015

Les scénarios de l'ANCRE (alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie), eux aussi utilisés dans les scénarios précités du DNTE, recourent à l'approche des « coins de décarbonation » (*decarbonization wedges*) qui permettent de quantifier et visualiser graphiquement l'impact de mesures au fil du temps, à partir d'une situation initiale. L'étude est faite au niveau mondial. Par exemple pour un pays

industrialisé mais moyennement carboné comme la France, l'on a des graphiques comme suit, présentant l'effet, au fil du temps, de différentes mesures (promotion des énergies renouvelables, efficacité, décarbonation...) dans différents secteurs (industrie, transports, bâtiment):



Source : Decarbonization wedges report, novembre 2015,
http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

Le rapport le plus récent date de novembre 2015⁷³ et a été préparé pour la COP21. L'approche se base sur les scénarios du DDPP.

La part du bâtiment dans le potentiel de réduction des émissions reste, année après année, aux alentours de 15 % pour un pays industrialisé moyennement carboné comme la France.

⁷³ Voir http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

2. Quelques enjeux techniques, considérations économiques, et contexte réglementaire

Les priorités d'intervention dans le secteur du bâtiment dépendent d'une analyse des contextes techniques, économiques, financiers, juridique, réglementaires, sociaux, etc.

Il existe de nombreux sujets importants pour une bonne compréhension du bâtiment du point de vue des consommations énergétiques et des émissions de GES : enveloppe, équipements, régulation, comportements (et leurs changements), climatisation, réglementation, rénovation et ses aspects techniques, économiques, financiers et de trésorerie, échelle d'îlots à énergie positive...

Le rapport CGEDD de 2013 indique, au sujet du facteur 4 dans le secteur du bâtiment, que « *Tous les techniciens s'accordent à considérer qu'aucun obstacle de nature purement technique ne s'oppose à cette perspective* ». L'avis « Les technologies et le changement climatique: des solutions pour l'atténuation et l'adaptation »⁷⁴ de novembre 2015 de l'Académie des technologies et le rapport éponyme⁷⁵ d'avril 2016 confirment cette analyse : en matière de consommation énergétique « *les technologies existent pour le bâti* » ; « *des bâtiments neufs à zéro émission sont livrés avec des performances correspondant aux prévisions ; les solutions techniques existent pour rénover les bâtiments existants mais le financement constitue la principale difficulté, d'où l'importance de la recherche et de l'innovation à faire dans le domaine de l'ingénierie financière* ».

Dans la suite on examinera à titre illustratif quatre enjeux techniques importants et représentatifs pour la réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES dans le secteur du bâtiment : le chauffage (en raison de sa part prépondérante tant dans les consommations d'énergie que dans les émissions de GES), le confort d'été (en raison des préoccupations croissantes y afférentes), le carbone « gris » (en raison de son importance méconnue et insuffisamment mise en exergue, et de la nécessité de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment dans les évaluations), et enfin les équipements électriques (en raison du fort taux de croissance de leur consommation énergétique, et, partant, de leurs émissions potentielles).

Dans la mesure du possible sera ensuite examinée la rentabilité carbone, ou le retour entre l'investissement financier et les diminutions attendues et obtenues des émissions de carbone, selon une approche en termes de coûts d'abattement permettant éventuellement une hiérarchisation des actions à mener.

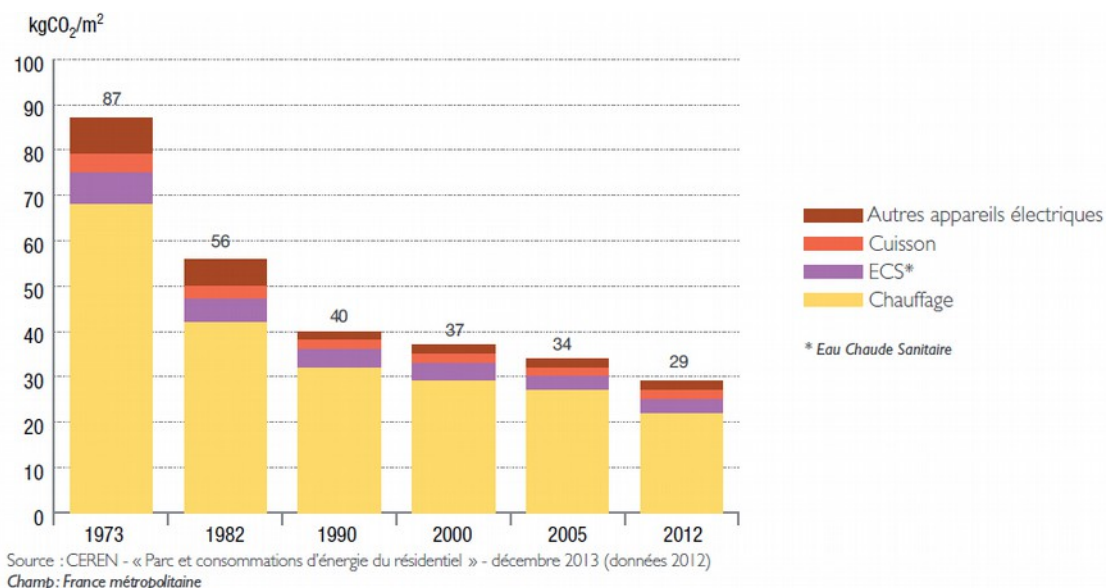
⁷⁴ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2015/12/02/14/44/13/795/Avis_TechnologiesClimat_20151110.pdf

⁷⁵ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2016/04/21/12/45/33/406/Rapport_TCC_DEF.pdf

2.1. Quelques enjeux techniques : chauffage, confort d'été, carbone « gris », électricité spécifique

2.1.1. Le chauffage, premier poste de consommation d'énergie et premier émetteur de GES

Au sein du logement, le poste chauffage reste le premier générateur de GES.



Émissions unitaires de CO₂ des résidences principales par m² et par usage – source, chiffres clés climat air énergie, ADEME, édition 2015, p. 67, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

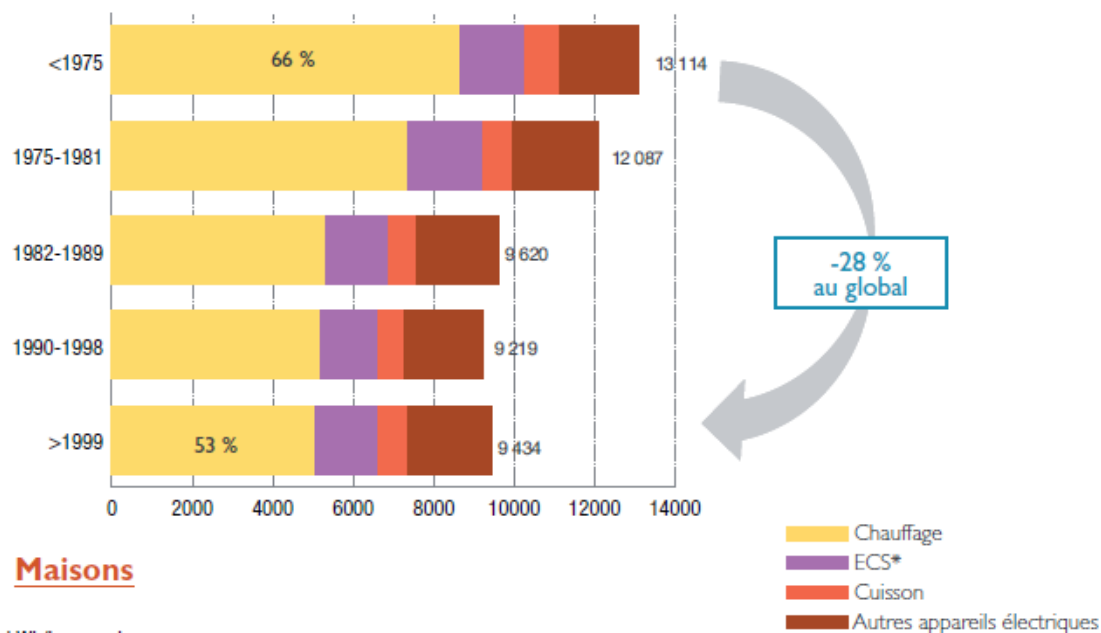
Même si sa part dans la consommation énergétique d'un logement baisse dans les constructions les plus récentes, le chauffage reste aussi le premier consommateur d'énergie dans le bâtiment, malgré la part croissante de l'électricité spécifique (« autres appareils électriques »).

Ce constat vaut tant pour le résidentiel que pour le tertiaire.

Pour le bâtiment résidentiel, l'illustration en est donnée en segmentant le parc selon une typologie qui s'appuie tant sur la date de construction que sur la distinction entre habitat individuel et collectif. Les performances globales, après des baisses significatives des consommations d'énergie, évoluent plus lentement depuis le début des années 80. Les consommations en chauffage diminuent, compensées en partie par d'autres usages.

Appartements

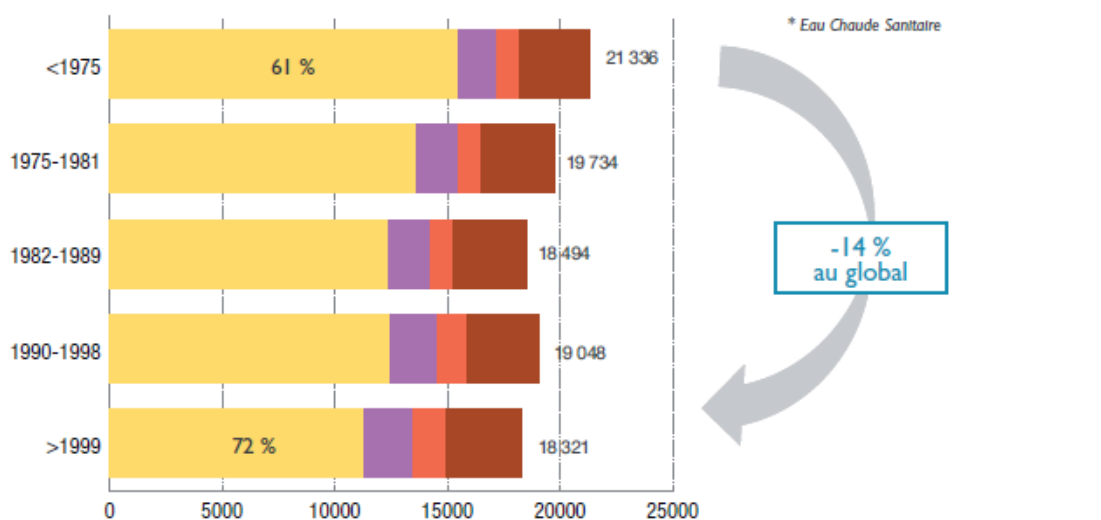
kWh/logement



-28 %
au global

Maisons

kWh/logement



* Eau Chaude Sanitaire

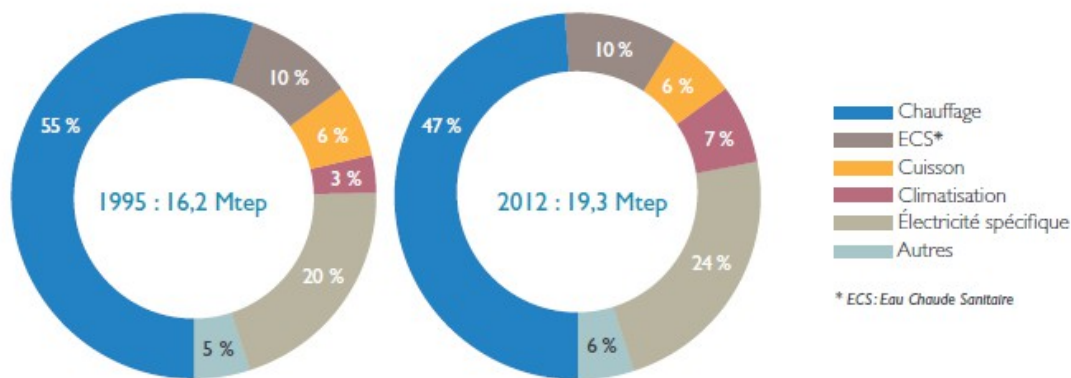
-14 %
au global

Source : CEREN - « Parc et consommations d'énergie du résidentiel » - décembre 2013 (données 2012)

Champ : France métropolitaine

Consommations unitaires par période de construction – source, chiffres clés climat air énergie, ADEME, édition 2015, p. 69,
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

Le chauffage est aussi la composante dominante de consommation énergétique pour le bâtiment tertiaire :



Source : CEREN - «Suivi du parc et des consommations d'énergie en 2012» - mars 2014
Champ : France métropolitaine, Données corrigées du climat

Répartition de la consommation d'énergie du secteur tertiaire par usages – source, chiffres clés climat air énergie, ADEME, édition 2015, p. 79, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

Des calculs provisoires de l'ADEME, suivant diverses méthodes, montrent que dans tous les cas, le chauffage est aussi le poste prépondérant d'émission de GES par unité de consommation énergétique⁷⁶.

FE (kgCO ₂ eq/MWh)	Méthode saisonnalisée par usage	Méthode mensualisée	Méthode horaire
Chauffage	190	91	92
ECS	73	71	73
Cuisson	76	70	72
Eclairage résidentiel	108	76	77
Lavage, froid et spécifique	57	67	68

Émissions de GES par unité d'énergie consommée selon les usages – source, ADEME

Il y a plusieurs pistes pour limiter cet impact du chauffage, dont la rénovation (enveloppe et équipements) et la décarbonation de l'énergie utilisée.

La rénovation est essentiellement fondée sur l'isolation (mais aussi la régulation, les équipements plus efficaces énergétiquement, etc.), permettant de réduire très fortement le besoin de chauffage.

Le changement du type de chauffage, et surtout de sa source, permet d'utiliser une énergie primaire moins carbonée, soit directement dans le bâtiment⁷⁷, soit en se raccordant au chauffage urbain.

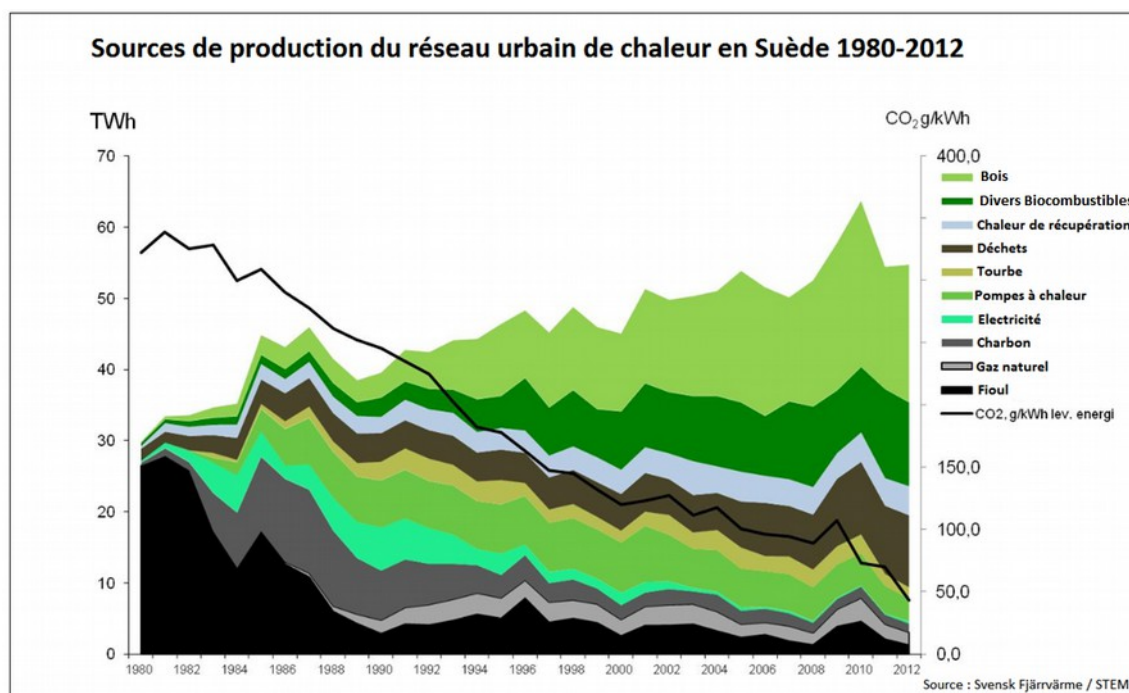
⁷⁶ Présentation le 8 mars 2016, au comité de suivi de la performance environnementale des bâtiments neufs

⁷⁷ par remplacement par exemple d'une chaudière à fioul par une pompe à chaleur électrique, cf. *infra*. Il faut rappeler que l'électricité est en France peu carbonée, cependant aujourd'hui l'électricité importée en période de pointe l'est souvent. Ce constat pose la question des smart grids et de l'effacement afin de limiter le recours à l'électricité à ces heures de pointe, par exemple en hiver le soir et en l'absence de vent

L'idéal reste la combinaison des deux, comme le faisait déjà remarquer le rapport CGEDD de 2013.

Il faut cependant parfois faire des choix, comme exposé *infra*.

La Suède, où la surface de locaux chauffée continue d'augmenter, a choisi prioritairement la voie du changement de la source du chauffage⁷⁸. Ce pays a effectué un ample basculement vers le chauffage urbain (avec aujourd'hui plus de 93 % des immeubles collectifs raccordés et augmentation de 4 TWh sur la période 2000-2012), et conduit une évolution majeure de ce type de chauffage en réduisant considérablement le recours au fioul au profit du bois, des déchets, etc.



Evolution du bilan carbone du réseau de chaleur urbain en Suède – Source, « les politiques mises en place pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants... », DG Trésor,

http://intra.daei.sg.i2/IMG/pdf/Rapport_ECI_performance_energetique_des_batiments_cle012c8c.pdf⁷⁹

Dans le même temps, la pose de PAC (pompes à chaleur⁸⁰) dans les logements des particuliers a fortement augmenté entre 2000 et 2011. Cela s'est traduit par une baisse des émissions de GES, sachant qu'en Suède, « la production électrique est largement décarbonée ... 48 % d'hydroélectricité, 38 % de nucléaire, 10 % de cogénération essentiellement biomasse-bois, 4 % d'éolien en 2012. ». Ainsi 6 TWh de production

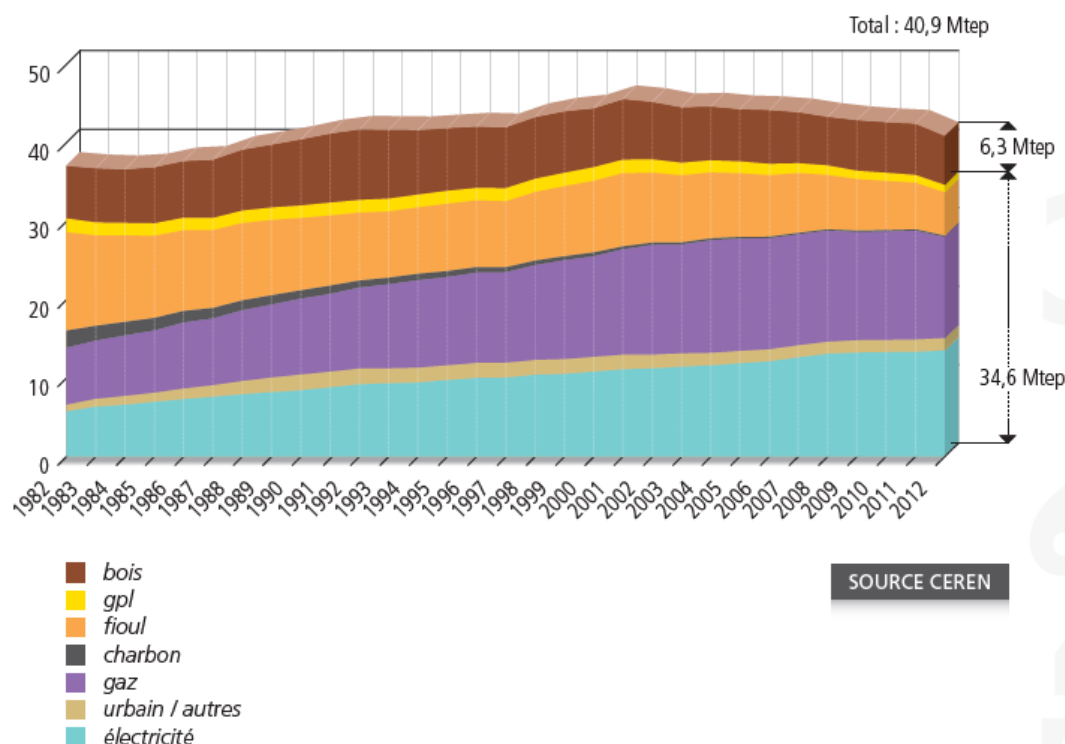
⁷⁸ cf. enquête de la DG Trésor, via huit services économiques auprès d'ambassades de France, dans huit pays, janvier 2014, voir http://intra.daei.sg.i2/IMG/pdf/Rapport_ECI_performance_energetique_des_batiments_cle012c8c.pdf

⁷⁹ In document de la DG Trésor de janvier 2014, d'analyse comparative dans 8 pays « les politiques mises en place pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants... » http://intra.daei.sg.i2/IMG/pdf/Rapport_ECI_performance_energetique_des_batiments_cle012c8c.pdf

⁸⁰ Une pompe à chaleur est un dispositif qui consomme de l'électricité pour transférer de la chaleur d'une source froide (par exemple l'extérieur) vers une source chaude (par exemple l'intérieur d'un bâtiment). Une pompe à chaleur est décrite par son coefficient de performance ou COP, le rapport entre la consommation d'électricité et la chaleur produite. Un COP de 3 est typique pour une PAC (pour 1 kWh d'électricité sa chaleur produite est de 3 kWh), voire 4, 5 ou plus pour des appareils modernes et bien configurés.

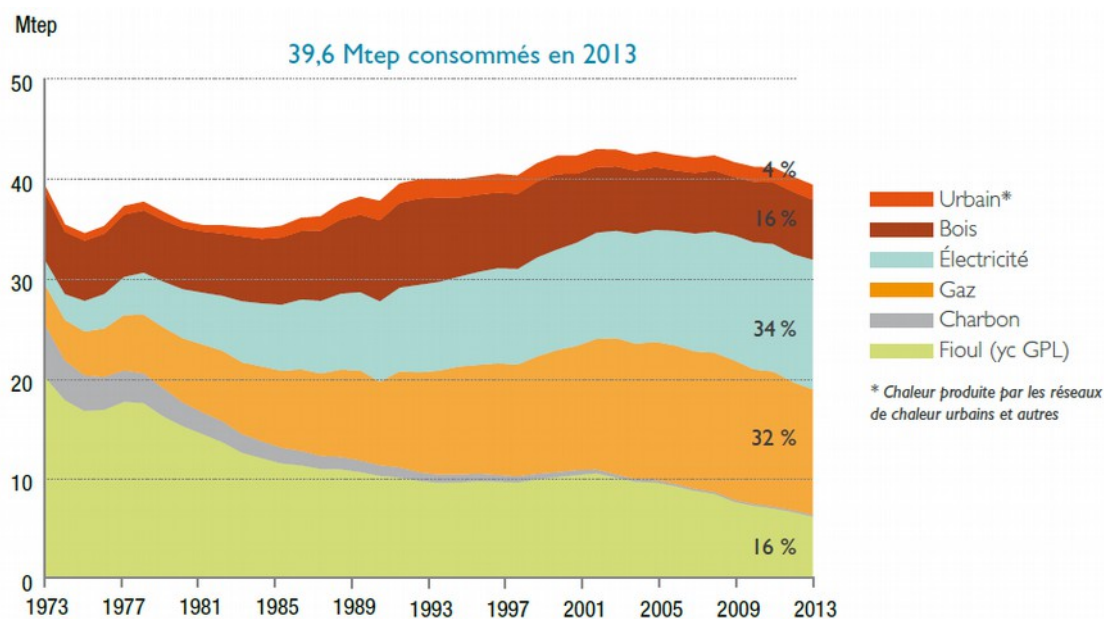
énergétique ont été décarbonées grâce aux PAC. L'autre cause de cette baisse des émissions issues de la production énergétique dans les bâtiments est le recours accru aux biocombustibles (+2 TWh).

En France, l'évolution des modes de chauffage se fait progressivement. Selon les chiffres clés de l'ADEME, édition 2013⁸¹ le fioul décroît dans le résidentiel, le bois stagne voire décroît, le gaz décroît légèrement (ce qui est sans doute à actualiser vu le regain du gaz dans la construction neuve à partir de 2012), l'électricité croît, et la consommation finale, après un maximum dans les années 2000, décroît lentement.

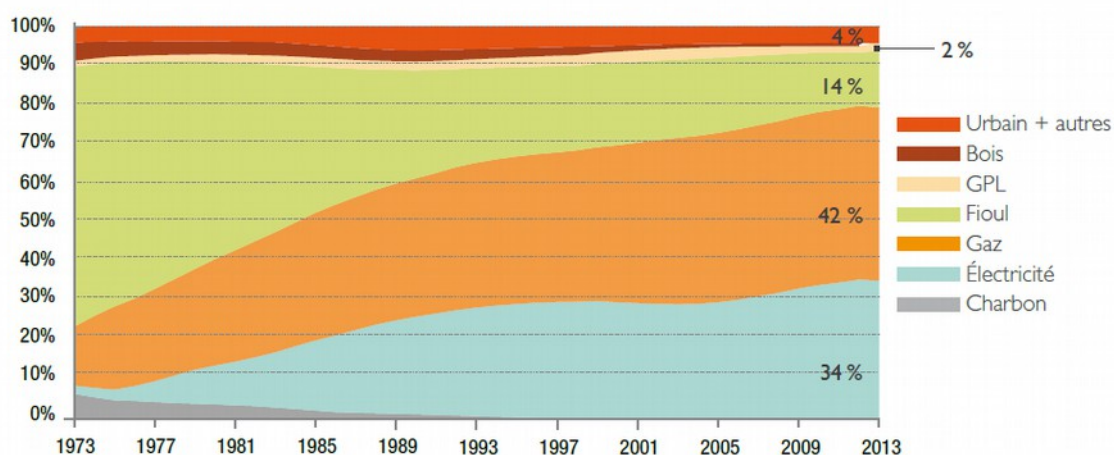


Consommation d'énergie finale dans le bâtiment résidentiel en France, à climat normal - Source : Chiffres clés bâtiment de l'ADEME page 41 et suivantes, <http://www.ademe.fr/expertises/batiment/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>

⁸¹ Source : Chiffres clés bâtiment de l'ADEME édition 2013 page 41 et suivantes, <http://www.ademe.fr/expertises/batiment/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>



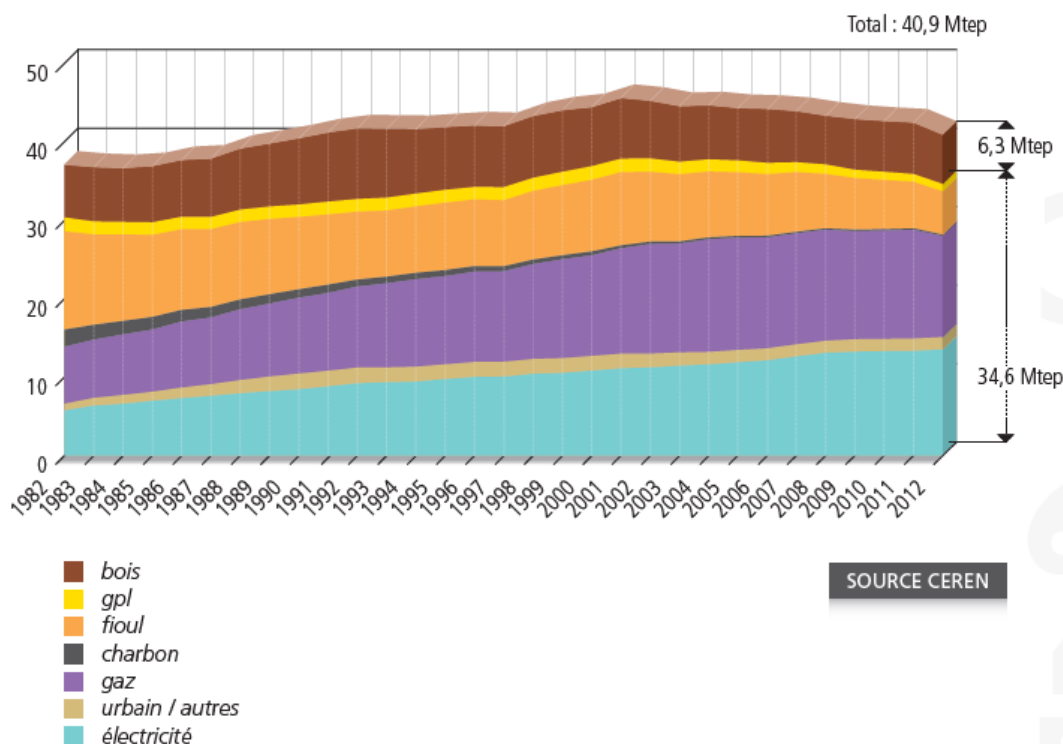
Évolution des consommations finales des résidences principales par énergie -
Source : Chiffres clés climat énergie, ADEME, édition 2015,
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-climat-energie-web.pdf>



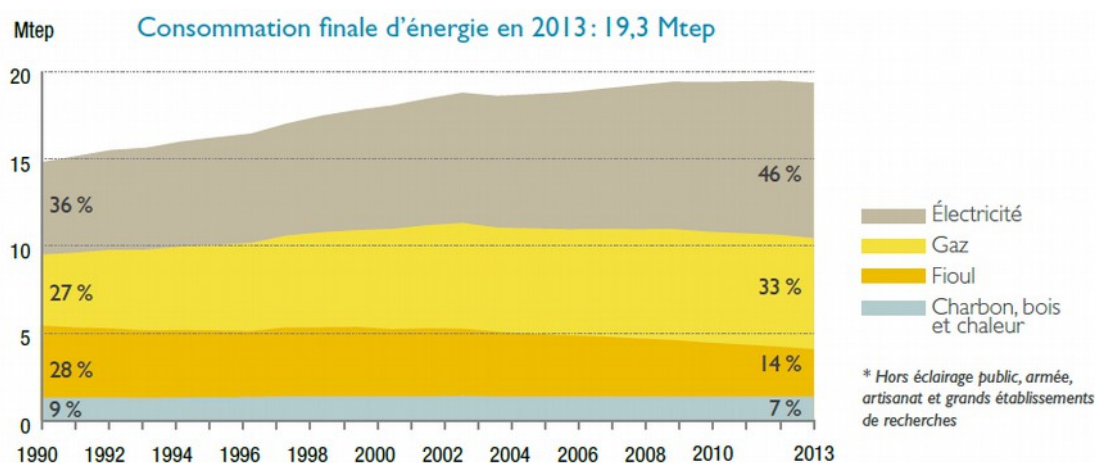
Source : CEREN - « Données statistiques - Parc et consommations d'énergie du résidentiel » - août 2015
Champ : France métropolitaine

Évolution de la répartition du parc de résidences principales selon l'énergie de chauffage principal - Source : Chiffres clés climat énergie, ADEME, édition 2015, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-climat-energie-web.pdf>

Dans le tertiaire, le fioul décroît, le gaz et l'électricité croissent, et la consommation finale globale continue de croître.



Consommation d'énergie finale dans le bâtiment tertiaire en France, à climat normal - Source : Chiffres clés bâtiment de l'ADEME page 78 et suivantes, <http://www.ademe.fr/expertises/batiment/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>

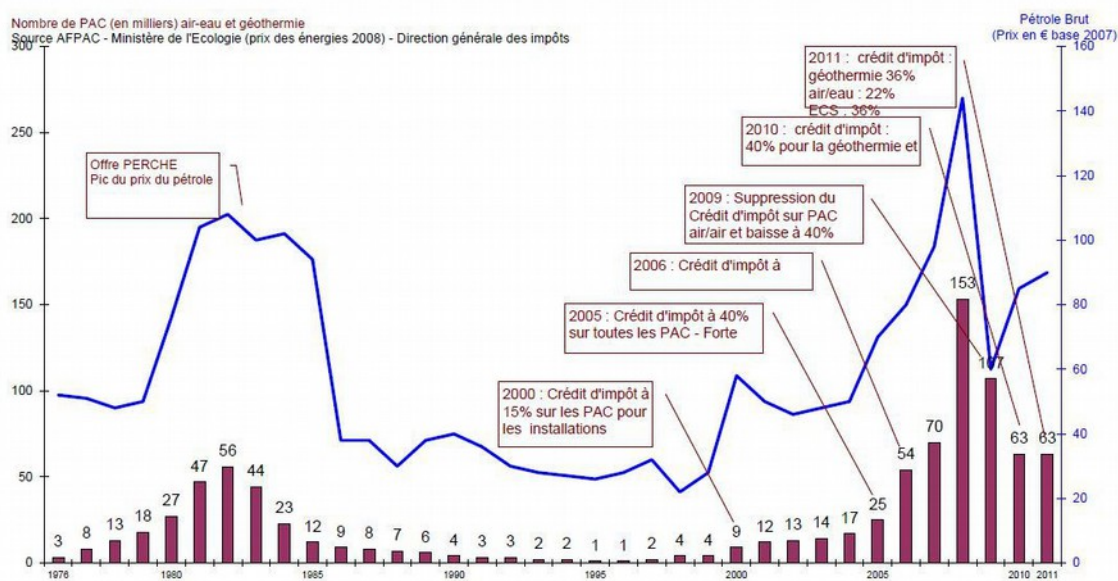


Source : CEREN - «Données statistiques du CEREN» - août 2015
Champ : France métropolitaine, Données corrigées du climat

Évolution des modes de chauffage des sites tertiaires par type d'énergie – Source : Chiffres clés climat énergie, ADEME, édition 2015, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-climat-energie-web.pdf>

L'un des enjeux est de continuer à diminuer la part du fuel dans le chauffage au profit des énergies moins émettrices. La croissance du gaz au détriment de l'électricité (plus décarbonée que le gaz en France) dans le bâtiment neuf est moins favorable à la diminution des émissions de GES.

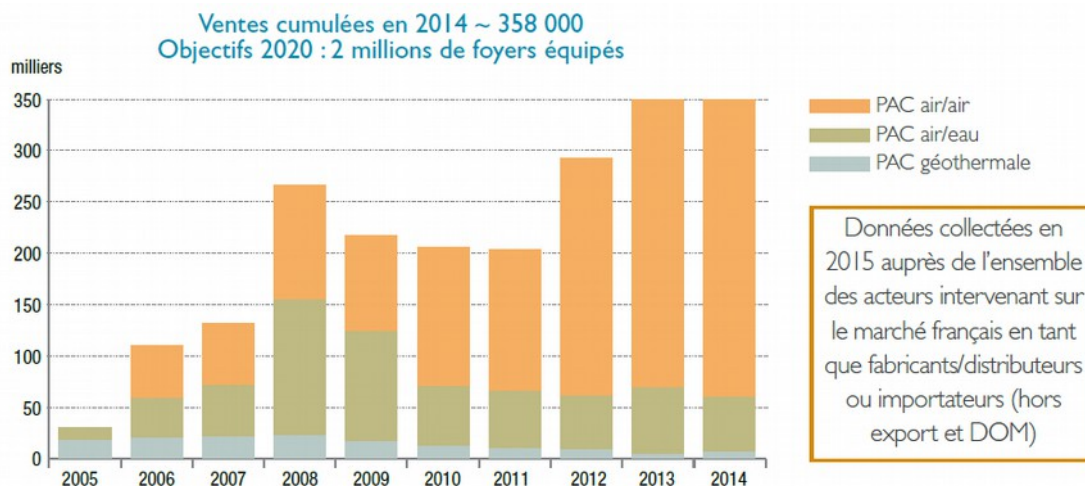
Un autre enjeu moyen de décarboner le chauffage passe par l'utilisation de pompes à chaleur, alimentées par l'électricité -décarbonée en France, ou l'utilisation du bois énergie. À ce sujet on a observé une diminution des installations de pompe à chaleur après 2008 (par exemple de 153 000 PAC air-eau et géothermie en 2008 à 63 000 en 2010, au gré des lois de finances ; et en tout, de 270 000 PAC environ en 2008 à un peu plus de 200 000 en 2010) et une stagnation de l'emploi du bois comme source de chaleur.



Nombre de PAC air-eau et géothermie vendues en France - Source : AFPAC
et <http://pompe-a-chaleur.architecteo.com/wp-content/uploads/2012/06/courbe-vente-pompe-chaleur-france.jpg>

Cependant l'avènement de la RT 2012 a relancé les ventes de PAC (et aussi de CET, chauffe-eau thermodynamique), et l'année 2013, avec son hiver froid, a entraîné une sollicitation accrue des pompes à chaleur⁸² ; par exemple selon l'AFPAC association française des pompes à chaleur, fin août 2014 72 000 PAC air/eau avaient déjà été écoulées en France, et les PAC équipent 40 à 50 % des maisons neuves. L'hiver froid de 2013 a aussi induit une consommation accrue de bois-énergie.

⁸² http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_2014.pdf et <http://www.hvac-intelligence.fr/actualites-economie-finance/croissance-des-ventes-de-climatisation-et-de-pompes-a-chaleur-pac-en-france/>



Note : entre 2008 et 2010, le crédit d'impôt pour l'installation d'une PAC est passé de 50 % à 40 % puis 25 % (sauf PAC air/air). Il est désormais de 30 % depuis le 1^{er} septembre 2014.

Source : Observ'ER - 2015
Champ : France métropolitaine

Évolution des ventes annuelles de pompes à chaleur (PAC) individuelles –
Source, Chiffres clés climat énergie, ADEME, édition 2015,
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe-climat-energie-web.pdf>

2.1.2. La nécessaire prise en compte du confort d'été, dans le contexte du changement climatique

Les besoins en chauffage prédominent dans le bâtiment en France mais le changement climatique peut amener un recours accru à la climatisation, avec les consommations énergétiques et émissions de GES corollaires. La fréquence accrue des températures élevées pendant la saison estivale, et l'extension de cette saison, constatées ces dernières années (y compris en 2016) obligent à mieux prendre en compte le confort d'été. La montée en puissance de la climatisation, avec d'ailleurs une chaîne de confort depuis les lieux professionnels (commerces, bureaux, hôpitaux, etc.), en passant par la voiture, augmente la consommation électrique et dans une moindre mesure les émissions.

L'accent initialement mis sur le confort d'hiver dans les réglementations en faveur des BBC (bâtiments à basse consommation), a fortement orienté vers des isolations fortes, et des situations d'inconfort important en fortes chaleurs, surtout sur plusieurs jours. La question n'est plus de savoir comment résister à une journée chaude, ce qu'un bâtiment bien isolé peut permettre, mais comment résister à plusieurs jours de fortes chaleurs d'affilée. Le facteur à prendre en compte est alors l'inertie thermique. Les techniques de ventilation naturelle, sur l'exemple de la construction en milieu tropical, peuvent alors être pertinentes.

Le cinquième congrès national du bâtiment durable (tenu en septembre 2016 à Marseille⁸³), a choisi la thématique du confort d'été, et permis des échanges riches sur le sujet. Sa conclusion majeure donne la priorité à la passivité. Il s'agit de faire en sorte que les systèmes techniques (climatisation, régulation de température, etc.) ne soient mobilisés qu'en dernier recours, lorsque la conception, et donc le fonctionnement passif du bâtiment ont produit leurs effets d'atténuation de la chaleur et donc diminuer

⁸³ Voir <http://www.congresbatimentdurable.com/>

les besoins énergétiques. Les intervenants ont tous confirmé l'utilité d'un urbanisme permettant de limiter les montées en température (îlots verts, plantations d'arbres de haute tige, etc.), d'une implantation adaptée des bâtiments (ce qui renvoie à l'indicateur de bioimplantation de la RT 2012, trop méconnu) pour limiter les expositions à l'ouest, profiter des vents, etc., d'une conception bioclimatique des bâtiments (double parois et claustras, conception traversante, ventilation naturelle, etc.).

Un enjeu relevé lors de ce congrès est non seulement d'aller à terme vers des bâtiments les plus passifs possibles (ce qui est proche de la démarche BEPOS des bâtiments à énergie nulle ou positive), mais aussi d'aller vers des quartiers ou territoires à énergie positive (QEPOS ou TEPOS).

2.1.3. Le carbone gris : vers une nécessaire analyse du cycle de vie et une plus grande utilisation des matériaux biosourcés

Les émissions de carbone sont dues, au moment de la construction, tant à l'énergie dépensée pour le chantier (transport, construction et installation), qu'aux émissions liées aux matériaux (extraction, transport, fabrication)⁸⁴, certains matériaux pouvant jouer à contrario un rôle de séquestration du carbone (matériaux dits « biosourcés », comme le bois). Ce « carbone gris » n'apparaît pas si l'on se focalise seulement sur les consommations d'énergie pendant l'usage et la phase de fonctionnement du bâtiment⁸⁵. Il convient cependant, pour être complet, d'envisager l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment, de sa conception jusqu'à son démantèlement.

2.1.3.1. Analyse des cycles de vie

Cette prise en compte insuffisante de l'énergie grise et corollairement du carbone gris, essentiellement contenue dans les travaux de construction et de rénovation, amenait le rapport CGEDD de 2013 à considérer comme un enjeu fort de favoriser nettement la rénovation par rapport à la construction, ce qui est en général valable sauf certaines exceptions⁸⁶.

Le Plan Bâtiment Durable⁸⁷, déjà cité, a récemment produit une note thématique #1 (groupe RBR⁸⁸) « vers des bâtiments bas carbone » basée sur un échantillonnage de 150 bâtiments neufs :

⁸⁴ cf. la norme EN 15978 relative à la soutenabilité environnementale des bâtiments, <http://etoolglobal.com/eblog/environnement/en-15978/>

⁸⁵ Sans y intégrer, cependant, les émissions liées aux transports occasionnés par la situation géographique du bâtiment vis à vis du lieu de travail par exemple. Certaines études (cf *infra*) font ce genre d'analyse. On se restreint ici aux émissions directes liées au cycle de vie.

⁸⁶ Dans les faits, c'est surtout la logique économique qui y pousse, la démolition reconstruction à surface identique étant onéreuse.

⁸⁷ Voir <http://www.planbatimentdurable.fr/>. « Lancé en janvier 2009, le Plan Bâtiment Durable fédère un large réseau d'acteurs du bâtiment et de l'immobilier autour d'une mission commune : atteindre les objectifs d'efficacité énergétique de ce secteur. ... Rattaché à la direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGLN) ..., le Plan Bâtiment Durable dispose d'une équipe permanente »

⁸⁸ Groupe de « réflexion bâtiment responsable 2020-2050 », au sein du Plan Bâtiment Durable (PBR) : note Bâtiment bas carbone : http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/RBR2020_vers_des_batiments_bas_carbone_version_finale-2.pdf

« Les émissions de gaz à effet de serre liées au bâtiment ont lieu tout au long de son cycle de vie: construction du bâtiment, exploitation, rénovation, fin de vie. ... Le projet HQE performance⁸⁹ a permis d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre de plus de 150 bâtiments neufs. Ces émissions représentent pour les matériaux et produits de construction et le chantier de l'ordre de 550 kg d'eqCO₂ par m² pour un immeuble de logement collectif. Ce chiffre montre l'importance d'optimiser ce « carbone gris ». Les valeurs varient entre 300 et 500 kg de CO₂eq/m² pour les maisons individuelles et 550 et 800 kg de CO₂eq/m² pour les immeubles de bureaux. Elles dépendent des caractéristiques du bâtiment (architecture, procédé constructif, matériau de construction...) et les efforts d'écoconception. Réhabiliter un bâtiment permet de conserver à minima le gros œuvre et la structure et d'économiser au minimum la moitié des émissions liées aux matériaux par rapport à une construction neuve. Les émissions correspondantes ont lieu à l'occasion des travaux de construction puis des différents travaux d'entretien et de rénovation.... Ces différents ordres de grandeur montrent que:

- dans une passoire énergétique les émissions en exploitation sont dominantes ;
- dans un bâtiment basse consommation les émissions en phase de construction ou de rénovation peuvent dépasser les émissions liées à l'énergie consommée pendant la phase d'exploitation. »

Ces travaux du Plan Bâtiment Durable mettent l'accent sur l'élargissement des perspectives avec une approche systémique (bâtiments et réseaux), une vision plus intégrée des impacts, l'analyse des cycles de vie, et la présentation d'ordres de grandeur utiles comme ci-après (en kg CO₂) :

Construction et rénovation	kg/m ²	
• Maison individuelle	300-500	
• Immeuble collectif	425-600	
• Bâtiment de bureaux	550-800	
Exploitation	kg/m ² .an	Total sur 50 ans en kg/m ²
• Usages immobiliers (RT 2012)		
Logement RT2012	5 à 10	225 à 500
Logement classe G du DPE	80	4000
Bureau classe G du DPE	145	7250
Equipements mobiliers	2-3	100 à 150
Déplacements	5 à 30	250 à 1500

Source : PLAN BATIMENT DURABLE, Groupe de travail Réflexion Bâtiment Responsable 2020-2050 (RBR 2020-2050) , Note thématique 1 du groupe RBR : « Vers des Bâtiments bas carbone », juillet 2015,
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/RBR2020_vers_des_batiments_bas_carbone_version_finale.pdf

Ces ordres de grandeur illustrent bien les fortes disparités entre les consommations, et l'importance du poids cumulé des émissions de GES d'une passoire thermique : plus

⁸⁹ Les chiffres détaillés sont disponibles: http://assohqe.org/hqe/IMG/pdf/14-027_HQEPerf_RapportPrincipal_VF.pdf

de dix fois les émissions dues à la seule construction et rénovation, alors que pour un bâtiment performant les ordres de grandeur des émissions sur la durée de vie et des émissions dues à la construction et au démantèlement sont similaires.

Le rapport CGEDD de 2013 indiquait : *« il est bien plus efficace de consacrer un même budget à l'amélioration du parc existant qu'à la substitution de bâtiments neufs, grands consommateurs d'énergie grise⁹⁰ quel que soit leur niveau de performance thermique, aux bâtiments anciens. Le bâtiment le plus vert est bien celui qu'on ne construit pas ! »*

Il convient alors de rappeler sans relâche la nécessité d'une réelle mobilisation des ressources, financières et humaines, sur le parc existant : on prévoit qu'en 2050, il y aura 35 millions de résidences principales, dont 25 millions sont déjà construites ! »

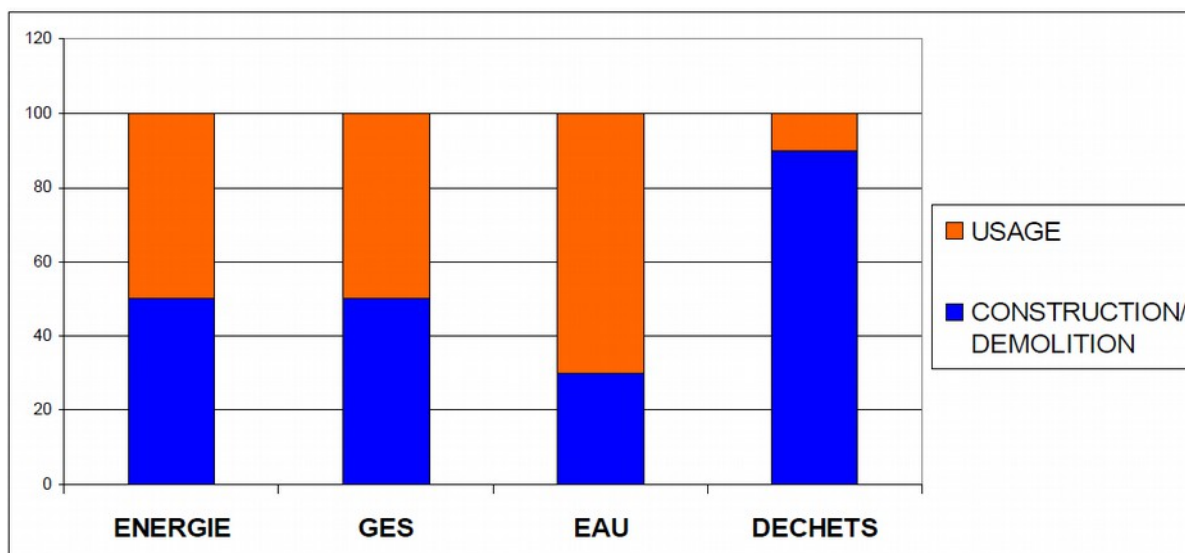
Au regard des chiffres ci-dessus, cette affirmation est à tempérer : il est sans doute efficace énergétiquement et du point de vue des émissions de GES de démolir et éventuellement reconstruire les bâtiments de classe G, voire F, pour lesquels même après réhabilitation il sera difficile d'obtenir des émissions correspondant à des classes B ou A. il reste cependant, en principe, à examiner l'efficacité économique des différentes options, les impacts sur le confort d'habitation (qui peuvent être positifs), les effets d'attachement qui peuvent aussi exister, la prise en compte du régime fiscal notamment sur les travaux neufs, et tenir compte, si on relogé à un autre endroit le ménage, des impacts sur les émissions de GES liées aux déplacements.

Les réflexions actuelles du « PLAN BATIMENT DURABLE-Groupe de travail « Réflexion Bâtiment Responsable 2020-2050 (RBR 2020-2050) »⁹¹, déjà cité, prennent en compte ces considérations d'analyse de cycle de vie ; de fait les projets en cours pour la RT2018⁹² pointent vers une réglementation de performance, assise sur la sobriété, l'efficacité, les énergies renouvelables et les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie.

⁹⁰ Pour un bâtiment de faible consommation, l'énergie grise peut représenter 50 années de consommation de chauffage. Le bureau d'études ENERTECH a estimé à 1300 kWh/m² l'énergie grise contenue dans un bâtiment de bureaux « à énergie positive » (sic), dont, soit dit en passant, 20 % soit 260 kWh/m² pour les panneaux photovoltaïques. Même les isolants contiennent de l'énergie grise, en quantité d'ailleurs très variable : une couche de laine de verre de 25 cm nécessite pour sa fabrication environ 300kWh d'énergie par mètre carré pour sa fabrication, et permet d'économiser environ 100kWh par an et par mètre carré. Une couche de 30 cm de ouate de cellulose permet des économies analogues, pour un coût énergétique de production de 15 kWh par mètre carré, soit vingt fois moins.

⁹¹ -Bâtiment bas carbone:
http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/RBR2020_vers_des_batiments_bas_carbone_version_final_e-2.pdf
-BEPOS http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/Telecharger_la_note_RBR_2020-2050_BEPOS_PV_et_Systeme_electrique_-Septembre_2015-2.pdf
-économie et valeur http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/Note_eco_valeur_v10_30-03-2016.pdf

⁹² Performance environnementale des bâtiments neufs, Bureau du CSF Bois, DGALN/DHUP, 6 avril 2016



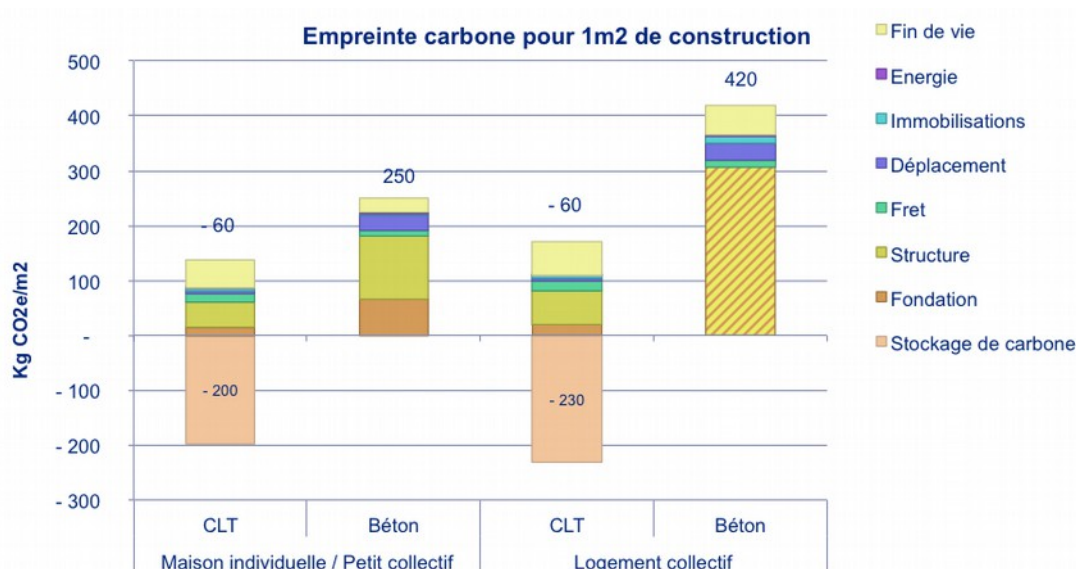
Source : Performance environnementale des bâtiments neufs, Bureau du CSF Bois, DGALN/DHUP, 6 avril 2016

Un référentiel d'évaluation de la performance environnementale des bâtiments neufs (PEBN) a été présenté au printemps 2016, un label réglementaire relatif aux GES pour le bâtiment neuf a été annoncé en juillet 2016, avec des expérimentations, en vue d'anticiper la réglementation et (sous réserve de validation) couvrirait les quatre impacts environnementaux (eau, déchets, émissions de GES et énergie primaire) sur le cycle de vie du bâtiment. Des projets de texte ont été présentés début septembre 2016 au Conseil supérieur de la construction et de l'efficacité énergétique, relatifs notamment au bâtiment à énergie positive et à haute performance environnementale sous maîtrise d'ouvrage de l'État, de ses établissements publics et des collectivités territoriales.

2.1.3.2. Matériaux biosourcés

L'autre enjeu mis en évidence par une approche prenant en compte le « carbone gris », est celui de l'utilisation des matériaux issus de plantes, ayant donc stocké du carbone, les matériaux « biosourcés » : bois, liège, chanvre, lin, paille, etc⁹³. Leur utilisation dans le bâtiment participe à la séquestration du carbone. Le graphique suivant présente (sous la dénomination inappropriée d'empreinte) un exemple comparatif de carbone gris lié à la construction en béton et à la construction en bois « CLT » (« bois lamellé-croisé », en anglais « *cross-laminated timber* »)

⁹³ Voir roseaux, algues, ou même matériaux issus des animaux, comme la laine et les plumes. Il existe aussi des matériaux mixtes, comme béton/chanvre ou ouate de cellulose de carton.



Source : carbone 4, <http://www.carbone4.com/sites/default/files/woodeum.png>

Du point de vue de l'isolation thermique, il n'y a pas d'avantage particulier pour de tels matériaux. Cela a conduit les acteurs à une certaine neutralité ayant pu nuire au développement de ces matériaux biosourcés. La prise en compte du carbone change la situation, tant dans la construction neuve que dans la rénovation.

En 2012, un rapport CGAAER/CGE/CGEDD (« les usages non alimentaires de la biomasse »⁹⁴) préconisait déjà :

- « Une politique de valorisation de la ressource française, de l'amont à l'aval :
- susciter la substitution de matériaux bio-sourcés aux matériaux fossiles ou plus énergivores,
 - encourager les usages des bois feuillus,
 - mobiliser plus de bois en relançant l'investissement forestier privé. »

Cependant la filière des matériaux biosourcés rencontre des difficultés⁹⁵. Les acteurs du secteur pointent notamment⁹⁶ :

- le manque d'organisation globale, avec des filières différentes, et, parfois, des difficultés internes à ces filières ;
- le manque de connaissance et de formation des professionnels du bâtiment ;

⁹⁴ Rapport CGEDD 008149-01 de septembre 2012 : voir http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/008149-01_rapport.pdf

⁹⁵ Une association dédiée aux matériaux biosourcés dans le bâtiment s'était créée, avec l'appui des pouvoirs publics : « Constructions et bioressources ». Elle avait activement travaillé avec les ministères en charge de l'environnement et du logement (DGALN/DHUP), en particulier au sein d'un groupe de travail spécifique, ce qui avait abouti à un plan d'action, dont l'avancement a été présenté en 2013 dans la brochure « les filières des matériaux de construction biosourcés : plan d'actions, avancées et perspectives¹ ». Mais, cette association n'a pas survécu.

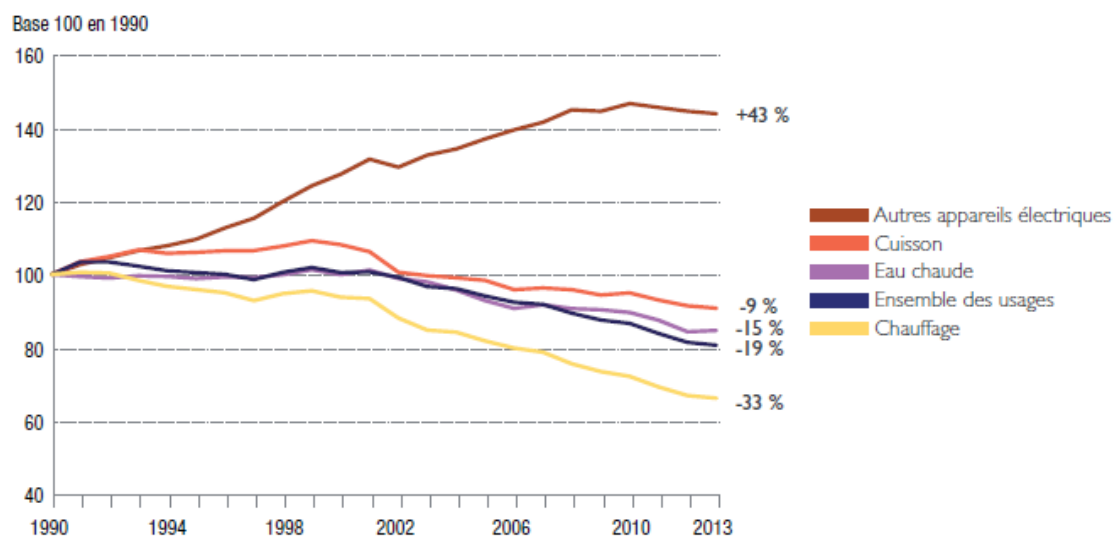
⁹⁶ Ces difficultés ne sont pas l'apanage de la filière des matériaux biosourcés, et se rencontrent dans d'autres métiers du bâtiment.

- les difficultés de prise en compte dans la normalisation du bâtiment, et en particulier à obtenir des avis techniques et à intégrer les DTU (documents techniques unifiés) ;
- l'absence de prise en compte dans les réglementations, en particulier la RT 2012 ;
- l'absence d'incitation (le retour sur la facture énergétique n'étant pas discriminant), puisque la maîtrise des émissions de GES est difficilement appréhensible par les particuliers.

2.1.4. Les équipements électriques et électroniques : une consommation électrique et des émissions en hausse

La structure physique du bâtiment (enveloppe, isolation, équipements de chauffage, climatisation et ventilation) n'est pas le seul déterminant des consommations et des émissions. Les analyses du Plan Bâtiment Durable montrent aussi l'importance (surtout une fois le bâtiment rendu moins énergivore, tant dans sa conception que dans sa consommation de chauffage) des équipements électriques, électroménagers, électroniques. Introduit par l'avis de novembre 2015 de l'Académie des technologies⁹⁷, le rapport d'avril 2016⁹⁸ « Les technologies et le changement climatique : des solutions pour l'atténuation et l'adaptation » consacre un chapitre aux technologies de l'information et de la communication (25 % de consommation pour la communication, 25 % pour les grands centres de calcul et le reste pour l'usage courant).

La consommation énergétique dite « spécifique » de ces équipements a fortement crû ces dernières années, à l'opposé des autres postes traditionnels et conventionnels de consommation. Par exemple, dans le secteur résidentiel, tous les usages voient leur consommation énergétique finale décroître sauf l'usage de cette électricité spécifique :



Sources : CEREN - «Données statistiques CEREN 2015» - août 2015 - / INSEE pour les logements
 Champ : France métropolitaine, Données corrigées du climat, Consommation finale par usage et par logement

Évolution des consommations finales des résidences principales, par logement et selon l'usage – Source, chiffres clés climat air énergie, ADEME, édition 2015, p.

⁹⁷ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2015/12/02/14/44/13/795/Avis_TechnologiesClimat_20151110.pdf

⁹⁸ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2016/04/21/12/45/33/406/Rapport_TCC_DEF.pdf

Dans le tertiaire la tendance est semblable avec le développement d'usages énergivores comme la bureautique et la communication : la consommation d'électricité pour seuls les usages spécifiques a ainsi fortement crû depuis 20 ans, passant à 24 % de la consommation finale du secteur tertiaire en 2012 contre 20 % en 1995 ; entre temps la croissance de la consommation finale a été d'environ 20 % cela correspond à une hausse d'environ 44 % depuis 1995.⁹⁹

Il importe dès lors de poursuivre les efforts de maîtrise de l'énergie de tels appareils : cela peut passer par la réduction des consommations, mais aussi par exemple par la récupération de la chaleur des ordinateurs.

Il importe aussi de mettre en place une gestion fine de la consommation d'énergie et donc de leur utilisation dans le bâtiment même, champ donc à privilégier pour la domotique en plein développement. Une telle gestion suppose d'abord un accès direct et aisé des données de consommation énergétique par l'utilisateur du bâtiment¹⁰⁰.

Cet aspect est encore plus important dans le tertiaire, vu l'importance des usages bureautique et informatique, sans parler des centres de stockage et traitement données informatiques (« data centers »).

Sur ces derniers points, ainsi que sur celui des télécommunications et sur l'émergence de l'internet des objets, le rapport précité de l'Académie des technologies recommande un taux de charge intermédiaire (ni trop élevé minimisant la consommation, ni trop faible optimisant le service au client) pour les data centers, la répartition de leurs charge au moyen du cloud, des travaux de minimisation des consommations des composants, l'optimisation des algorithmes et logiciels, la récupération de l'énergie dissipée par les équipements. Le rapport considère aussi que les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) doivent contribuer à réduire les impacts des activités humaines (dans le bâtiment par exemple, la gestion des systèmes urbains et immeubles intelligents) et que le bilan à terme entre émissions directes des NTIC et bénéfices indirects devrait être positif. Les incertitudes sont cependant telles (notamment en ce qui concerne l'internet des objets) que le bilan final des NTIC sur les émissions de GES n'est pas encore clair, dans le secteur du bâtiment comme dans les autres secteurs.

2.2. Coûts des mesures, priorisation, phasage : des choix délicats

Les mesures envisageables, si elles sont techniquement efficaces, doivent aussi être économiquement viables. Le rapport CGEDD de 2013 se penche longuement sur la question des coûts d'abattement, montrant la difficulté des calculs, et s'interrogeant sur la pertinence même d'une hiérarchisation. Ses considérations restent encore largement valables, et sont donc ici reprises, avec une simple actualisation.

⁹⁹ chiffres clés climat air énergie, ADEME, édition 2015, p. 76, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf> ; voir aussi graphique « Répartition de la consommation d'énergie du secteur tertiaire par usages » *supra*.

¹⁰⁰ Ce qui renvoie à des problématiques plus vastes d'amélioration technologique, d'efficacité énergétique, d'étiquetage énergétique, de fourniture de données de fonctionnement, etc.

2.2.1. Les analyses du rapport CGEDD de 2013

2.2.1.1. Évaluation des coûts globaux de rénovation : toujours 40 Md€/an

Le rapport CGEDD de 2013 s'attache d'abord à une tentative d'évaluation des ordres de grandeur, considérant que « *les études précitées, proposant des scénarios de contraction des émissions, notamment dans le secteur du bâtiment, se sont soigneusement écartées de toute estimation financière, qu'il s'agisse du budget de l'État ou de celui des ménages (...) On a vu que le secteur résidentiel-tertiaire émet, en 2014¹⁰¹, 72 Mt de CO₂ (combustion d'énergie) et les émissions corrigées des variations climatiques sont de 84 Mt. Pour un peu plus de 30 millions de logements cela représente environ de deux à trois tonnes par logement et par an.*

Les estimations des coûts de rénovation thermique « ambitieuse » – de type « facteur 4 » – s'établissent le plus souvent entre 30 000 et 60 000 € par logement. Le prix de la tonne annuelle économisée est alors de 10 à 30 000 €, conduisant avec l'hypothèse optimiste d'une durée de vie de l'investissement de 30 à 40 ans, et sans actualisation des économies d'émissions, à un coût à la tonne de l'ordre de 250 à 1 000 €, ce qui est bien sûr considérable.

En considérant qu'il convient de rénover 25 millions de logements, le coût total à consentir est compris entre 750 et 1 500 Md €. Étallé sur les quelque quarante ans qui nous séparent de 2050, l'investissement se monte alors, en chiffres ronds, de 20 à 40 Md€ par an, pour le seul secteur du résidentiel. »

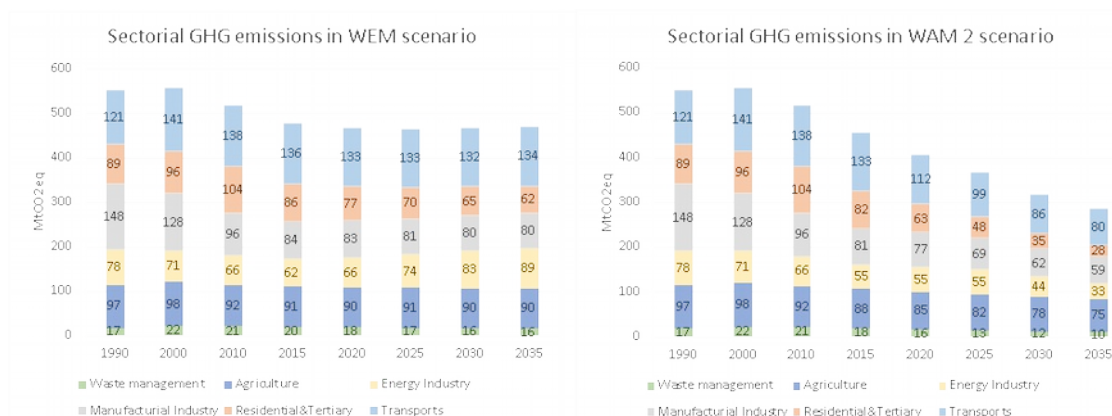
Ces ordres de grandeur sont peu ou prou confirmés par des travaux de 2014 de l'ADEME (« stratégie rénovation énergétique des bâtiments dans l'objectif du facteur 4 – période 2013-2020 » ¹⁰²: « *si on retient 450 € par m² de surface chauffée comme valeur moyenne de l'investissement à consentir, le budget total à consacrer à la seule réhabilitation énergétique de tous les bâtiments existants au niveau du Facteur 4 serait de 1 570 milliards d'Euros (450 € x 3,49 milliards de m²), soit 39 milliards d'Euros par an durant 40 ans* »

Enfin, l'exercice « Scénarios Prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 » ¹⁰³, piloté par la DGEC et en date de septembre 2015, décline un scénario AMS2 (« avec mesures supplémentaires 2 ») par rapport au scénario AME (« avec mesures existantes »); le scénario AMS2 est le scénario de référence de la SNBC, a une vocation nationale, et prend en compte les mesures adoptées ou annoncées après le 1^{er} janvier 2014, à la différence du scénario AME « avec mesures existantes ».

¹⁰¹ Les chiffres du rapport de 2013 ont été actualisés par la mission avec les chiffres de 2014

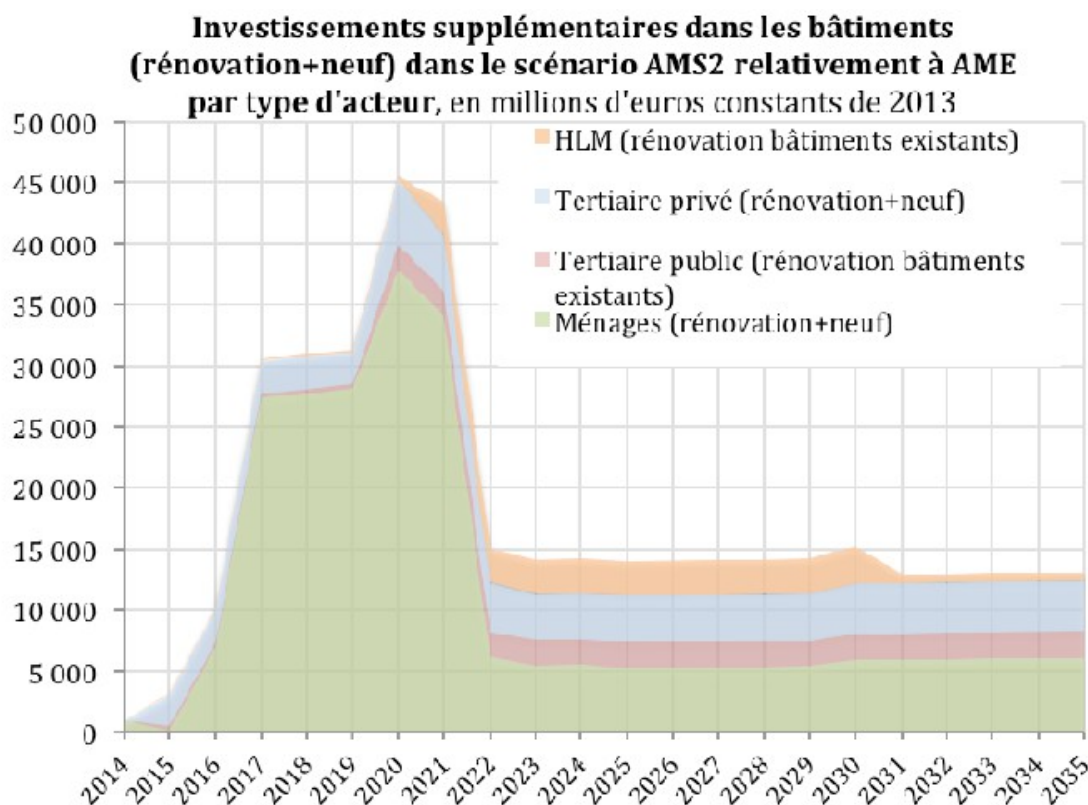
¹⁰² <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/strategie-renovation-energetique-batiments-objectif-facteur-4-2014.pdf>

¹⁰³ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf



Émissions sectorielles pour le scénario AME (en anglais WEM) et AMS2 (en anglais WAM 2) ; Source : DGEC, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

Pour le domaine du bâtiment, par exemple, AMS2 envisage 550 000 constructions neuves par an contre environ 330 000 pour AME ; de même le nombre de rénovations intermédiaires ou performantes est plus élevé dans AMS2 que dans AME ; les résultats en termes d'émissions à l'horizon 2035 sont très différents pour AMS2 (28 MtCO₂eq) et AME (62 MtCO₂eq) ; les coûts supplémentaires associés au scénario AMS2 pour le bâtiment (par rapport à AME) sont « plus de 30 milliards d'euros par an entre 2017 et 2019, 40 à 45 milliards d'euros en 2020 et 2021, une quinzaine de milliards d'euros par an sur le restant de la période (2022-2035). L'écart d'investissements cumulés dans le domaine du bâtiment du scénario AMS2 par rapport à AME atteint 390 milliards d'euros sur la période 2014-2035 »



Source : Seureco/Erasmus, « Scénarios Prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 », http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

2.2.1.2. Hiérarchisation des investissements dans un environnement variable et incertain

Le rapport de 2013 approfondit alors la nécessaire, mais difficile, hiérarchisation des investissements.

« L'ampleur de ces investissements pose bien sûr le problème de leur soutenabilité. Une récente étude (octobre 2012) de l'UFE (Union Française de l'Électricité)¹⁰⁴, consacrée au seul objectif intermédiaire du « Grenelle », celui d'une baisse de 38 % en 2020 des consommations d'énergie du parc existant de bâtiments, annonce avec une franchise honorable, mais un peu abrupte, que :

- « dans l'état actuel des politiques publiques, les objectifs de Grenelle ne sont pas atteignables », ce qui de fait est à peu près avéré au regard de l'état des lieux présenté en partie 1, et confirmé par une étude commandée en 2011 par le CGDD (Études et documents n° 58, Évaluation des mesures du Grenelle de l'Environnement sur le parc de logements)¹⁰⁵ ;
- « le niveau actuel des prix des énergies ne permet pas de rentabiliser la plupart des actions d'efficacité énergétique ». Il s'agit là des actions qui s'ajouteraient à celles qui découlent des politiques publiques, et qui seraient donc spontanément engagées par les divers maîtres d'ouvrage (propriétaires occupants, bailleurs sociaux, gestionnaires d'immeubles tertiaires...).

De fait, l'étude précitée mettant assez haut la barre de la rentabilité, avec notamment une actualisation à 10 % des économies d'énergie ou d'émissions, elle ne considère comme rentables que peu d'actions, notamment pour les logements chauffés au gaz ou à l'électricité : l'isolation des combles en logement collectif, par exemple. La mise en place de pompes à chaleur air/air en remplacement de convecteurs, dans les logements chauffés à l'électricité, qui joue un grand rôle dans les scénarios de faisabilité technique, n'est qualifiée que de « proche du seuil de rentabilité » ; elle deviendrait rentable avec un taux d'actualisation de 5 % au lieu de 10 %. Fort heureusement, un tel taux est sans doute considéré comme acceptable par bien des propriétaires, comme a semblé le démontrer le comportement des acquéreurs de logements neufs à l'égard des bâtiments « BBC » préfigurant la RT 2012. Les propriétaires de logements chauffés au fuel sont par ailleurs mieux lotis, si l'on peut dire. Le remplacement des chaudières fuel par des chaudières à condensation gaz dans les maisons individuelles présenterait un taux de rentabilité interne de 30 %. Mais le gisement serait mince en quantité totale d'énergie économisée.

Le grand mérite de cette étude, réalisée par une analyse très complète des certificats d'économie d'énergie délivrés ces dernières années, est, en fait, de classer les diverses actions par rentabilité décroissante. Cela peut certes orienter les politiques publiques, mais n'est pas d'un très grand secours pour le propriétaire d'un logement, qui aura bien sûr besoin d'une étude particulière.

Car la « rentabilité » des actions d'efficacité énergétique ne varie pas seulement en fonction des diverses actions ; elle dépend aussi de la situation initiale du bâtiment

¹⁰⁴ Voir : <http://ufe-electricite.fr/publications/etudes/article/etude-ufe-sur-efficacite>

¹⁰⁵ Voir <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED58.pdf>

considéré. L'étude précitée du CGDD comporte une matrice des « coûts de transition » entre les différentes classes du diagnostic de performance énergétique : passer de G à F coûterait ainsi 50 €/m², mais de B à A 350 €/m²¹⁰⁶. On peut alors estimer les temps de retour sur investissement à 4 ans pour passer de G à F, mais à 100 ans pour passer de B à A. »

La baisse récente des prix de l'énergie (carbonée : pétrole, gaz, ...) depuis 2014 aggrave la problématique de rentabilité purement économique des investissements d'efficacité énergétique.

Une actualisation possible du rapport CGEDD de 2013 concerne les prix de rénovation pour passer d'une classe à l'autre, et les conséquences qui en découlent. Cette actualisation est faite ci-après.

2.2.1.3. L'enchaînement des tâches : rénovation complète ou succession de rénovations ?

Du fait du mix énergétique de l'électricité française (très nucléarisée), il convient de différencier efficacité énergétique et efficacité carbone. L'importance de l'électricité dans le chauffage, avec un prix de l'électricité aux augmentations difficilement contenues par l'intervention du gouvernement, rend là encore les calculs et prévisions (pronostics?) encore plus complexes, voire hasardeux.

Ceci amène donc le rapport du CGEDD de 2013 à s'interroger sur le dilemme de l'enchaînement des tâches : rénover au mieux d'un coup, à un coût élevé, ou rénover en plusieurs fois, à un coût unitaire moindre mais un coût global supérieur et au risque d'assécher le gisement après la première rénovation « light ».

« Il a été indiqué plus haut que les récentes réalisations de bâtiments très performants ont fait apparaître les importants gisements d'amélioration – ou de corrections d'erreurs – que comportaient les modalités d'exploitation et d'occupation, et ont suggéré que de tels gisements existent aussi dans l'existant, notamment dans les bâtiments tertiaires.

De fait, lors du lancement des comités opérationnels « Grenelle », les acteurs de l'efficacité énergétique « active » que sont les entreprises telles que Schneider Electric (alors que l'efficacité énergétique « passive », reposant sur la performance de l'enveloppe a pour entreprise emblématique Saint-Gobain) ont souvent suggéré qu'ils étaient en mesure de garantir des réductions de consommation significatives, de l'ordre de 20 à 25 %, en intervenant sur des bâtiments tertiaires existants avec peu d'investissements, amortis en cinq à dix ans. La formule contractuelle proposée était celle du contrat de performance énergétique, avec obligation de résultat, et avec ou sans préfinancement par l'opérateur.

Il a certes été fait bon accueil à ces propositions, mais l'orientation générale du dispositif « Grenelle » a été nettement plus ambitieuse, et l'a été à juste titre, dès lors qu'il était déjà établi que le respect de l'objectif du « facteur 4 », posé dès 2005, imposait un effort considérable au secteur du bâtiment. Il a été dit et écrit que les principes du contrat de performance énergétique étaient excellents, mais qu'il convenait de les appliquer à des rénovations plus ambitieuses qu'une simple optimisation de l'exploitation à l'aide de quelques horloges ou capteurs. La principale difficulté paraissait alors de susciter l'offre correspondante de travaux : les grands groupes du BTP, alors dans une situation assez euphorique, manifestaient a priori peu

¹⁰⁶ Ces valeurs sont susceptibles d'actualisation ou de recherches complémentaires, cf *infra*

d'enthousiasme pour des engagements de très longue durée, avec de plus une obligation de résultats fort difficile à assumer, comme le savent tous les maîtres d'ouvrage, dans les opérations de rénovation.

La situation a aujourd'hui bien changé : la crise a gravement affecté les budgets des autorités publiques, des investisseurs et des ménages et donné un coup de frein au boom de la construction. Les grandes entreprises du BTP, tout comme les petites et les artisans, mettent de grands espoirs dans le marché de la rénovation énergétique, et ont fait, comme on l'a dit, de grands progrès dans la qualité de leurs offres.

Reste que l'ampleur des investissements à consentir limite le zèle. L'État lui-même, qui s'était engagé à être « exemplaire » n'est pas vraiment sur le chemin de son « facteur 2 en dix ans » pourtant consacré par la loi « Grenelle 1 ».

On voit alors refluer la tentation de la rénovation « light », telle qu'elle était proposée en 2008, et alors même que la faisabilité technique des rénovations ambitieuses a été démontrée depuis.

C'est de fait une question difficile. Les partisans de l'efficacité énergétique « passive » – cet adjectif n'ayant rien de péjoratif – craignent que la réalisation prioritaire de telles rénovations « faciles » ne « tue le gisement » et ne viennent condamner, quelles que soient les résolutions vertueuses proclamées, toute intervention ultérieure plus ambitieuse. À quoi il est souvent répondu, et pas seulement par les tenants de l'efficacité active, que la minceur actuelle des ressources ne doit pas condamner à l'inaction, et qu'il vaut mieux gagner 20 % que rien du tout.

L'hésitation est permise. L'est bien sûr un peu moins ce qui semble être une persistante indifférence des occupants des bâtiments, résidentiels ou tertiaires, aux gaspillages induits par certains comportements, notamment en matière de respect des températures. »

À ce niveau micro-économique, certains¹⁰⁷ considèrent, en effet, que la priorisation des interventions (entre les différents « gestes » cités par l'OPEN¹⁰⁸ par exemple) sur un logement est une erreur tant économique, qu'en termes d'énergie. En effet, d'une part les coûts de main d'œuvre, d'échafaudage, etc., sont tels qu'il faut les minimiser en ne prévoyant qu'une seule intervention (ce qui est probable sur des travaux de grande ampleur, sur des immeubles par exemple, mais moins sur des maisons), et d'autre part, les gains sont plus importants, voire parfois ne surviennent que par une combinaison de diverses techniques (comme isolation + changement de système de chauffage). Et donc, à première vue, l'enjeu économique réside plutôt dans la réduction maximale des coûts (via par exemple une certaine industrialisation, et au moins une meilleure efficacité et donc professionnalisation des entreprises du bâtiment), sur une intervention unique et globale, et donc non priorisée, en se limitant à des ordres de grandeurs d'intervention minimaux, d'environ 30 000 € (ce qui correspond aujourd'hui aux plafonds pris en compte par les divers dispositifs d'aides publiques).

Le contexte économique et financier (en particulier créé par la fiscalité et les aides publiques, d'une part, ou par une meilleure organisation de la profession, d'autre part) est donc important pour la prise de décision du propriétaire, mais les enjeux de comportements, de pratiques sociales le sont tout autant, sinon plus.

¹⁰⁷ cf. par exemple Olivier Sidler d'ENERTECH (www.enertech.fr)

¹⁰⁸ Observatoire Permanent de l'amélioration Énergétique du bâtiment

2.2.1.4. Enchaînement des tâches – la rénovation en plusieurs étapes semble marginalement plus coûteuse que la rénovation en une seule étape, et reste plus accessible

Il est cependant possible d'apporter quelques éléments quantitatifs à ces réflexions qualitatives, en se basant sur des matrices des « coûts de transition ».

La matrice des coûts de transition citée plus haut dans le rapport CGEDD de 2013 est la suivante ; elle est issue d'une publication du CGDD en date de 2011¹⁰⁹ et de publications du CIRED en 2012¹¹⁰:

		Final energy class (J)					
		F	E	D	C	B	A
Initial energy class (i)	G	50	150	300	500	750	1,050
	F		110	260	460	710	1,010
	E			170	370	620	920
	D				230	480	780
	C					290	590
	B						350

Table 1: Matrix of initial transition costs (€/m²)

Matrice des coûts de rénovation en €/m² pour passer d'une classe énergétique (à gauche du tableau) à une autre (en haut du tableau). - Source, Évaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements, collection études et documents n°58 du CGDD, novembre 2011, http://www.lepole.org/wp-content/uploads/2012/09/ED58_etudes1.pdf

Cette matrice, construite « à dire d'expert » et utilisée par le modèle « Res-IRF », est calculée à partir des données disponibles de manière à obéir à trois principes : le coût de la rénovation la plus exigeante (transition G à A) est proche de celui d'une construction neuve (1200€/m² à l'époque), le coût incrémental de rénovation est croissant, et il est préférable de faire une transition directe qu'une transition en deux étapes. Elle présente certaines régularités, par exemple, le coût de rénovation par m² pour passer d'une classe à celle immédiatement plus efficace, est toujours exactement 60€/m² de plus que le coût de rénovation pour passer de la classe immédiatement précédente à la présente. Une telle régularité n'est sans doute pas le résultat d'une observation.

Cette matrice présente par ailleurs des coûts élevés, de 40 à 70 % supérieurs à ceux de la matrice dite « de l'ADEME » dans cette étude du CGDD, qui admet par ailleurs que de nombreuses incertitudes subsistent quant aux valeurs contenues dans la matrice.

¹⁰⁹ Évaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements, collection études et documents n°58 du CGDD, novembre 2011, http://www.lepole.org/wp-content/uploads/2012/09/ED58_etudes1.pdf

¹¹⁰ Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling, L.G Giraudet, C. Guivarch, Ph. Quirion, Energy Economics 34 (2012), pp. 426-445

La matrice permet cependant un calcul simple et présente une particularité intéressante : si l'on calcule le coût pour passer directement d'une classe à une autre, et si l'on le compare à des scénarios qui passent d'une classe à l'autre en plusieurs étapes, on constate que le surcoût (positif par construction) de la segmentation des rénovations n'est pas excessif. Par exemple pour passer de la classe G à la classe A il en coûte 1050€/m² ; Si maintenant l'on passe de G à F puis de F à E et ainsi de suite jusqu'à la classe A, le coût total de ces rénovations successives se monte à 1200€/m².

On est loin du postulat évoqué plus haut selon lequel « ce qui coûte c'est l'échafaudage »¹¹¹, et selon lequel le coût fixe d'une rénovation est le plus important, imposant donc de minimiser ce coût fixe en ne faisant qu'une rénovation complète pour passer directement à la classe énergétique la meilleure.

Maintenant il est clair que la matrice qui vient d'être utilisée est une construction plus qu'issue de mesures sur échantillon. De plus, les coûts indiqués se sont avérés élevés après discussion avec les praticiens.

Une autre matrice a donc ensuite été construite, qui affine les chiffres, notamment en utilisant les résultats des rapports OPEN. Elle est disponible, par exemple dans un rapport de 2014 de la DG Trésor¹¹² qui cite pour la France une matrice de transition issue de travaux du CIRED sur la base de données ADEME. La matrice est la suivante :

	F	E	D	C	B	A
G	76	136	201	271	351	442
F		63	130	204	287	382
E			70	146	232	331
D				79	169	271
C					93	199
B						110

Matrice des coûts de rénovation en €/m² pour passer d'une classe énergétique (à gauche du tableau) à une autre (en haut du tableau). - Source, Les politiques mises en place pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants (logements privés, sociaux, bâtiments tertiaires) – analyse comparative dans 8 pays, DG Trésor, janvier 2014, <http://intra.daei.sg.i2/les-politiques-mises-en-place-pour-ameliorer-la-a4321.html>

Cette matrice est bâtie sur un peu plus de données que la précédente, et préserve les deux derniers principes qui président à la construction de la matrice précédente : elle renonce donc à l'hypothèse que le coût de la rénovation la plus exigeante (de G à A) est proche de celui de la construction neuve. En conséquence elle donne des coûts de rénovation bien inférieurs à la précédente. Mais elle partage avec la précédente la propriété que pour une classe énergétique de départ donnée et une classe énergétique d'arrivée donnée, le surcoût de rénovations successives par rapport à une seule rénovation est faible : typiquement 10 à 15 % au maximum. Par exemple rénover de G

¹¹¹ Même si de fait, les coûts d'échafaudage peuvent être dirimants en rénovation d'immeuble collectif.

¹¹² Les politiques mises en place pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants (logements privés, sociaux, bâtiments tertiaires) – analyse comparative dans 8 pays, DG Trésor, janvier 2014, <http://intra.daei.sg.i2/les-politiques-mises-en-place-pour-ameliorer-la-a4321.html>

à A directement coûte 442€/m², et en passant par toutes les classes intermédiaires le coût est de 491€/m².

Selon ses auteurs, la construction de la matrice se heurte systématiquement à la difficulté suivante : les coûts de rénovation sont à peu près connus poste par poste, mais pas par transition.

Cependant les auteurs estiment que cette matrice reflète au mieux l'état des connaissances actuelles. Une révision sur la base de la dernière enquête OPEN (campagne 2015) est prévue pour 2017.

Ainsi il semble, sur la base de ces éléments quantitatifs disponibles examinés par la mission¹¹³, que le surcoût de rénovations successives puisse dans certains cas¹¹⁴ être faible par rapport à une rénovation complète. Avec un coefficient d'actualisation, on peut même inférer que le coût est identique voire moindre que celui de la rénovation complète immédiate, en raison de la moindre valeur de l'argent dans le futur.

Cela est favorable à une rénovation par étapes, qui est par ailleurs sûrement plus accessible à la majorité des bourses. Une rénovation complète suppose une mobilisation financière excessive pour beaucoup de ménages ou acteurs économiques, et est donc une marche trop élevée à franchir, les difficultés étant économiques mais aussi de trésorerie. Le constat, s'il est avéré, que le surcoût d'une rénovation par étapes est faible voire nul, est de nature à favoriser la rénovation à grande échelle chez les particuliers, pourvu que l'intérêt économique de cette rénovation soit apparent, ce qui est encore un autre sujet.

Le problème se pose différemment pour des opérateurs et gestionnaire de parc de logements sociaux, qui ont moins de difficulté à effectuer des rénovations coûteuses.

Le sujet du phasage des rénovations est aussi apparent dans l'article 14 de la LTECV qui prévoit la remise du Gouvernement au Parlement d'un « *rapport sur les moyens de substituer à l'ensemble des aides fiscales attachées à l'installation de certains produits de la construction une aide globale dont l'octroi serait subordonné, pour chaque bâtiment, à la présentation d'un projet complet de rénovation, le cas échéant organisé par étapes, réalisé par un conseiller à la rénovation certifié sur la base de l'étude de faisabilité mentionnée au 2° du même article et un rapport sur la nécessité d'effectuer une évaluation de la performance énergétique des travaux réalisés.* ».

Cette approche en termes de coût peut être complétée :

- la rentabilité énergétique (ou carbone) peut ensuite être calculée sur la base des coûts de changement de classe et des économies réalisées par changement de classe énergétique ;
- le risque peut subsister de limiter l'effort aux étapes partielles, sans aller au bout, ce qui est pourtant l'objectif souhaitable, et donc de « tuer les gisements d'économie d'énergie », en effectuant les travaux les moins chers en premier,

¹¹³ D'autres éléments plus agrégés sont disponibles. Par exemple un rapport de juin 2013 de la Caisse des Dépôts et consignations sur la base de travaux du cabinet Carbone 4, segmente les rénovations en quatre selon le type de logement à rénover (énergivore, classe E à G, 2000 €/an de facture énergétique annuelle moyenne ; ou non énergivore, classe C ou D, 1250 €/an de facture) et le type de rénovation (lourde, 20000 € de travaux, 40 % d'économie ; ou légère, 10000€ de travaux, 30 % d'économies). Cf. http://www.cdcclimat.com/IMG/pdf/rapport_caisse_des_depots_financement_de_la_renovation_energetique_des_logements_privés_27juin2013.pdf et Carbone 4, "Maîtrise de la demande dans le bâtiment résidentiel. Un Grand programme de rénovation", Octobre 2012

¹¹⁴ À savoir, les zones de validité de ces matrices

et en reportant, avec une très faible rentabilité marginale, les travaux les plus coûteux, voire à les abandonner ; cette affirmation ne fait que reprendre la croissance du coût incrémental de rénovation, croissance postulée dans les matrices vues ci-dessus, mais modérée ; le risque de « tuer le gisement » semble donc, sur la base des connaissances disponibles, modéré ; en pratique, il convient, si l'on envisage une succession de rénovations partielles, d'établir à tout le moins un projet d'ensemble de rénovation dans lequel s'inscrivent les rénovations partielles successives ; un tel projet d'ensemble peut prendre en compte les risques d'assécher le gisement d'économies, les durées de vie différentes des différentes composantes rénovées, et aussi d'éviter qu'une rénovation ultérieure n'exige endommagement ou renouvellement d'une rénovation antérieure¹¹⁵ ;

- les modalités de financement peuvent elles-mêmes changer et favoriser les rénovations globales : par exemple une évolution de l'Eco-PTZ vers des durées plus longues de 20 à 30 ans pourrait faire évoluer les calculs de rentabilité et retour d'investissement sur des projets plus globaux.

Les données disponibles méritent d'être confirmées et fiabilisées, et de fait le seront dans un avenir proche. On peut aussi espérer que les données permettront à terme de désagréger la matrice en plusieurs matrices adaptées chacune à une typologie de bâtiment, par exemple maison individuelle, appartement en chauffage individuel, appartement en chauffage collectif et que les matrices correspondantes seront plus représentatives. Mais en tout état de cause, une matrice des coûts de rénovation assise sur un échantillonnage significatif peut être un outil utile de décision.

2.2.2. Quelques courbes d'abattement récentes du CGDD – des investissements qui payent à long terme

En complément aux rappels et actualisations précédentes, un projet de note du CGDD « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût » (consulté en juin 2016 par la mission) présente des « courbes dynamiques d'abattement moyen » des émissions de GES. Ces courbes permettent de quantifier et visualiser les impacts et coûts de mesures d'investissement de rénovation, par secteur ou de manière intégrée, dont celle pour le bâtiment.

Cette approche présente, de l'aveu des auteurs de la note, diverses limites : modélisation simplifiée du secteur électrique, périmètre des émissions, cinétiques sommaires du déploiement des mesures, limite de ce que l'on peut faire dire aux coûts, en raison des incertitudes, de la non-prise en compte de certaines interdépendances, des coûts de transaction ou de certaines externalités positives, etc.

Cela étant dit et compte tenu de ses hypothèses, les résultats de l'étude sont les suivants:

¹¹⁵ A contrario, certaines rénovations sont structurellement robustes vis à vis de rénovations ultérieures, comme les chaudières modulaires à condensation par exemple, à large gamme de puissance (p.ex;5-26 kW) et permettant d'accommoder tant un bâtiment peu performant que le même bâtiment largement rénové thermiquement

Encadré 4 : Code couleur utilisé pour l'ensemble des figures

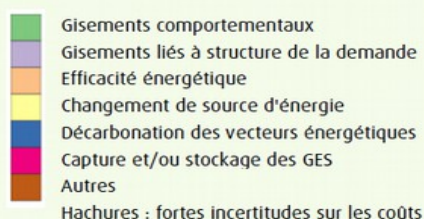
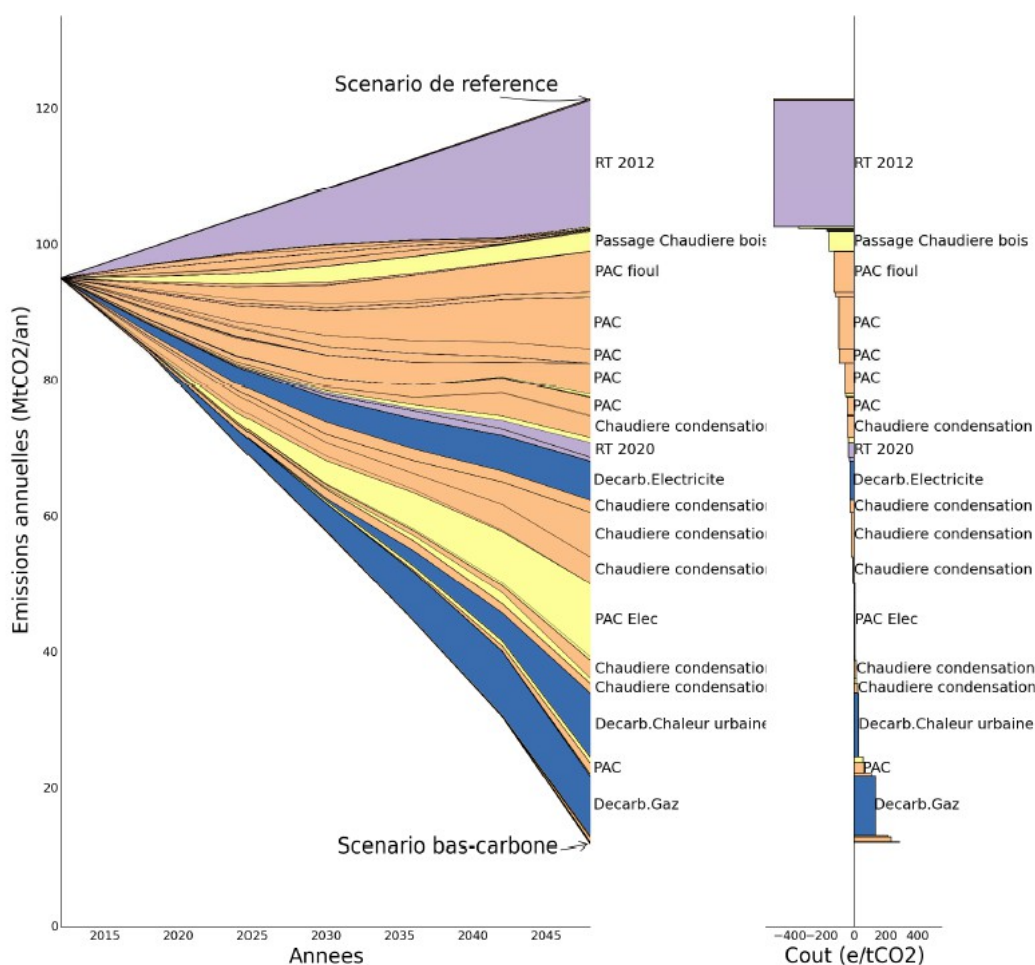


Figure 11 Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Bâtiments



Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de réduction d'émissions à 2050 - Source - Projet de note du CGDD « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », juin 2016¹¹⁶

Ces courbes sont relatives à un objectif à long terme de réduction des émissions, ce qui rentabilise beaucoup d'investissements. On peut y observer, par exemple, que la RT2012 a un impact important à terme, ainsi que la décarbonation des vecteurs énergétiques, et aussi que la mise en place d'équipements performants : pompes à chaleur (PAC), chaudières à condensation, etc. Les coûts présentés sont négatifs (ce

¹¹⁶ Dans le graphe, les différentes mentions similaires correspondent à des types de bâtiment différents. Les actions d'isolation sont prises en compte mais leur libellé n'apparaît pas, d'autant plus que certaines apparaissent dans des fuseaux se refermant sur eux même avant 2050.

qui veut dire un investissement rentable même sans valorisation du carbone émis) ou faiblement positifs, à l'exception de la décarbonation du gaz.

2.2.3. Une analyse de Carbone 4 : la rénovation BBC rentable, la construction BEPOS beaucoup moins sauf prix du carbone très élevé

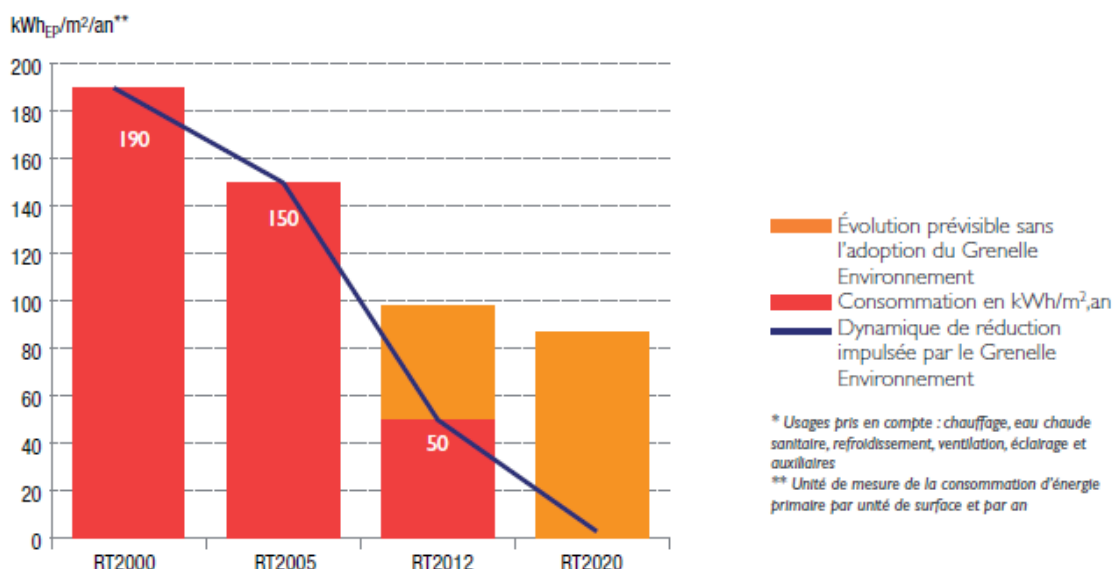
Dans le même esprit et pour conclure, l'association Carbone 4 (fondée par Jean-Marc Jancovici¹¹⁷) a publié en juin 2016 (in « lettre du carbone N°4 », sous le titre « l'État au secours de la décarbonation de l'économie : combien ça coûte ? ») les résultats d'une étude des coûts d'abattement pour atteindre les niveaux BBC (RT 2012), voire « BEPAS » (ou : « bâtiment à énergie passive »¹¹⁸). Le coût d'abattement pour atteindre le niveau BBC peut être négatif (c'est-à-dire que celui qui y investit gagne de l'argent, du fait des économies de fonctionnement) : « *la rénovation BBC des 11 millions de logements de performances moyenne et énergivore, et chauffés au gaz ou au fioul, permettrait d'abattre des tonnes de CO₂ à un coût de l'ordre de -10 à 150 €/tCO₂ (environ 78 € en moyenne).* » Et « *la construction BEPAS permet d'abattre des tonnes de CO₂e à un coût de l'ordre de 400 à 600 €/tCO₂e par rapport à une construction RT 2012 chauffée au gaz.* ». Le surcoût est bien plus élevé si la construction est chauffée à l'électricité, du fait du mix énergétique français très nucléarisé.

2.3. Réglementations thermiques – une efficacité tributaire des volumes de construction et de rénovation

Les réglementations thermiques imposées en France depuis 1974 ont permis des avancées significatives vers des bâtiments moins consommateurs d'énergie. Le diagramme ci-après récapitule les différentes étapes depuis 2000 pour les bâtiments neufs, ainsi que les perspectives.

¹¹⁷ Voir <http://www.carbone4.com/>

¹¹⁸ Précision donnée par Carbone 4 : Non défini réglementairement en France, on désigne par ce terme un concept inspiré du label allemand de performance énergétique « Passivhaus ». Il s'agit d'un bâtiment qui consomme moins de 15 kWh d'énergie primaire par m² et par an pour les usages de chauffage et de rafraîchissement. En pratique, cela est encore plus performant mais reste dans les ordres de grandeur du niveau de consommation des bâtiments dits « à énergie positive », ou BEPOS selon le label Effinergie, avec au plus 40 kWh d'énergie primaire par m² et par an pour tous les usages réglementaires. Cela correspond aussi à une classe énergétique A. Le chauffage n'est pas individualisé dans le BEPOS, mais en première approximation il est raisonnable de considérer que le niveau de consommation de chauffage du BEPAS est identique à celui à atteindre en BEPOS. En revanche, le BEPOS intègre la production renouvelable intégrée au bâti, mais cela ne concerne pas la performance de l'enveloppe, qui est bien mieux reflétée par la consommation de chauffage. C'est donc cette seule valeur de 15 kWh d'énergie primaire par m² et par an que nous avons utilisée pour nos calculs.



Exigences réglementaires de consommation énergétique des bâtiments neufs
 – Source, *Climat, air, énergie*, édition 2015, ADEME, p 63,
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

La réglementation thermique actuellement en vigueur, la « RT 2012 », applicable depuis le 1^{er} janvier 2013, s'est donné comme objectif une réduction du niveau de consommation énergétique d'un bâtiment. Elle s'applique à la production de chaleur et d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments neufs. Elle plafonne l'importation d'énergie par un bâtiment au niveau de sa consommation conventionnelle en énergie primaire pour 5 usages (Cep_{max}¹¹⁹ de 50 kWh/m²/an) en la modulant). Cette réglementation¹²⁰ a permis de diviser par 3 les consommations d'énergie des bâtiments neufs par rapport à la réglementation précédente, en promouvant la sobriété du bâti et l'efficacité des systèmes énergétiques. Malgré diverses critiques¹²¹ (en particulier : sur l'intérêt qu'il y aurait de plutôt se fonder sur l'énergie consommée, et non l'énergie primaire ; sur des calculs défavorisant l'électricité, très décarbonée en France ; sur la non réelle prise en compte de l'enjeu de la décarbonation ; etc.), elle marque donc une étape importante dans la maîtrise de l'énergie dans les bâtiments¹²².

Le rythme des constructions neuves reste stable globalement, après une récente baisse en dessous de 400 000¹²³ logements autorisés par an (et 350 000 réellement

¹¹⁹ Cep : consommation en énergie primaire

¹²⁰ Plus que réglementation thermique, on devrait parler d'une « réglementation énergétique », puisque les cinq usages portent sur l'éclairage, etc., et qu'un critère important porte sur l'implantation du bâtiment.

¹²¹ Voir en particulier l'avis de l'Académie des technologies de novembre 2014: http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2015/02/09/15/51/52/84/AVIS_RT2012_2020_DEF.pdf

¹²² même si globalement, toute construction neuve, s'il elle n'est pas BEPOS, accroît la consommation d'énergie, aussi minimisée soit-elle

¹²³ Parmi lesquels environ 100 000 logements sociaux. Mais, dans ce cas, les calculs ne sont pas aisés. Ainsi, l'USH (Union Sociale pour l'Habitat, regroupant les organismes d'HLM) indique en 2015, faisant le point des chiffres de 2014 : « la croissance nette du parc HLM est estimée à 121 000 logements. ... Elle dépend des mises en service (77 000), des acquisitions (6 000), et de la prise en compte du parc d'un nouvel adhérent HLM (60 000), diminuées des démolitions (14 000) et de la vente de logements ... (8 000). voir : <http://ressourceshlm.union-habitat.org/ush/RapportsAuxCongres/Les+Hlm+en+chiffres+2015>

commencés). La part des logements en collectifs et résidences s'accroît par rapport aux logements individuels (y compris groupés).

Autorisations	2013	2014	2015
Total	432 885	381 075	383 100
individuels	200 085	161 146	157 100
collectifs et résidences	232 800	219 929	226 000

Tableau 1 : Autorisations de construction, Source : CGDD¹²⁴

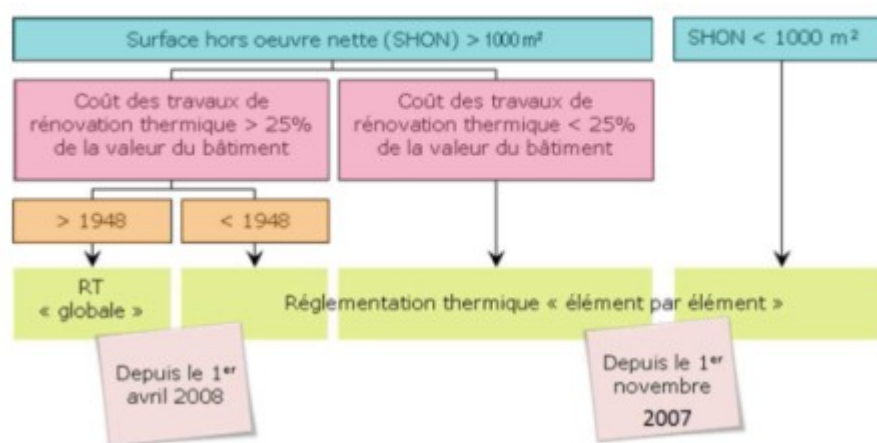
Commencés	2013	2014	2015
Total	376 700	343 600	349 800
individuels	175 600	142 400	138 100
collectifs et résidences	201 100	201 200	211 700

Tableau 2 : travaux neufs commencés, source : CGDD

Le sujet, majeur, de la rénovation est plus délicat, car la définition d'une rénovation est parfois être perçue comme malaisée: par exemple le changement de fenêtres (démarche la plus courante, du fait de l'existence d'une filière professionnelle spécifique) peut-il être considéré comme une rénovation ?

La réglementation applicable en France est la réglementation thermique 2007 et 2008 et elle définit ce qu'elle entend par « rénovation ». La RT 2008 s'applique pour les rénovations lourdes (25 % de la valeur du bâtiment) et les grandes surfaces (plus de 1000 m²), avec application de la méthode « RT globale » pour les bâtiments antérieurs à 1948 et de la méthode RT « éléments par éléments » pour ceux postérieurs à 1948. La RT 2007 recouvre aussi le reste, couvert par la méthode RT « éléments par éléments ». La RT « éléments par élément » est à la date de rédaction (octobre 2016) en cours d'examen pour un possible rehaussement des seuils.

RT globale ou RT "élément par élément"?



Source : rt-batiment.fr

Source : <http://www.planbatimentdurable.fr/comprendre-la-rt-existant-r175.html>

Il existe de nombreuses autres définitions des rénovations, pas forcément décorréliées d'ailleurs.

¹²⁴ statistiques du CGDD, voir [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/logement-construction/r/construction-logements.html?tx_ttnews\[tt_news\]=20093&cHash=d61cdf2eda81471461a87269b2c68fdf](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/logement-construction/r/construction-logements.html?tx_ttnews[tt_news]=20093&cHash=d61cdf2eda81471461a87269b2c68fdf)

La directive européenne 2010/31/UE dite « efficacité énergétique des bâtiments » définit les « rénovations importantes » d'un bâtiment comme coûtant au moins 25 % de la valeur du bâtiment hors terrain¹²⁵, ou comme concernant plus de 25 % de la surface de l'enveloppe.

Des classifications ont aussi été proposées (cf *supra* le rapport précité de la Caisse des dépôts et consignations (CDC) et de Carbone 4 en date de juin 2013) pour la rénovation lourde (20 k€ de travaux , 40 % d'économies) ou légère (10k€, 30 % d'économies¹²⁶) de bâtiments énergivores (classe E à G) ou non énergivores (classe C et D).

L'observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement (OPEN¹²⁷), mis en place et piloté par l'ADEME (et qui suit les logements privés en Métropole), permet aussi d'approcher la notion de « rénovation », en considérant les « logements ayant fait l'objet d'une rénovation énergétique performante et très performante ». Cette notion de « performance » n'est pas quantifiée en termes d'économie d'énergie, mais en termes de nombre de « gestes » effectués, avec au moins deux gestes performants sur les cinq suivants : chauffage, ECS (eau chaude sanitaire), fenêtres, murs, toiture / combles ; un geste est performant s'il est « théoriquement compatible avec les niveaux requis pour les critères d'obtention des aides » à l'année considérée.

¹²⁵ Incidemment, la réglementation thermique 2008 pour la rénovation lourde (RT dit globale, cf <http://www.planbatimentdurable.fr/comprendre-la-rt-existant-r175.html>) prend aussi en compte ce seuil de 25 % de la valeur hors foncier du bâtiment : au dessus de ce seuil, et si la surface hors œuvre nette (SHON) est supérieure à 1000 m² et la date d'achèvement du bâtiment est postérieure au 1^{er} janvier 2008, alors la méthode de la « RT globale » s'applique et dans tous les cas. Sinon c'est la RT « élément par élément » qui s'applique.

¹²⁶ Incidemment, la réglementation thermique 2008 pour la rénovation lourde (RT dit globale, cf <http://www.planbatimentdurable.fr/comprendre-la-rt-existant-r175.html>) prend aussi en compte ce seuil de 30 % d'économie mais pour les rénovations lourdes dans le tertiaire.

¹²⁷ http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

3. Les cibles et contraintes nationales et internationales

Le rapport du CGEDD de 2013, objet de la présente actualisation, a été rédigé en 2012. Des évolutions importantes ont eu lieu depuis 2012-2013 :

- l'entrée en vigueur, au 1^{er} janvier 2013, de la réglementation thermique 2012 (RT 2012), anticipée par certains acteurs avant 2012 ;
- la loi pour la transition énergétique et la croissance verte (LTECV) d'août 2015 (en particulier son titre II : « mieux rénover les bâtiments pour économiser l'énergie, faire baisser les factures et créer des emplois ») ;
- la stratégie nationale bas carbone (SNBC), adoptée dans la foulée de la loi (en particulier les recommandations sectorielles pour le « résidentiel-tertiaire ») ;
- les engagements de la France, dans le cadre des engagements de l'Europe, suite à l'accord de Paris de la COP21 (ratifié par la France en juin 2016), ou INDCs (*Intended Nationally Determined Contributions*).

Par ailleurs, en 2016, les travaux de préparation d'une réglementation technique nouvelle avancent, en vue de remplacer la RT 2012, dès 2018 ([voir 4 ci-dessous](#)).

Ces orientations doivent contribuer à répondre aux enjeux de la transition énergétique dans le domaine du bâtiment. Les éléments qui suivent précisent les évolutions du point de vue des objectifs et contraintes.

3.1. La LTECV

La **LTECV**¹²⁸ du 17 août 2015, consacre son titre II au secteur du bâtiment et notamment à la rénovation. Elle a pour objectifs d'accélérer la rénovation énergétique (500 000 rénovations lourdes par an avec priorité au traitement de la précarité énergétique), avec renforcement des performances pour être au standard BBC (bâtiment basse consommation) en 2050.

Spécifiquement, l'article 1 de la LETCV vise pour 2050 un parc immobilier rénové en fonction des normes «BBC (« bâtiment basse consommation »), ce qui correspond typiquement à des consommations inférieures à 50 kWh d'énergie primaire par an et par m².

L'article 17 prévoit à cet effet une obligation de rénovation prolongée par décennie de 2020 à 2050 avec un niveau de performance renforcé pour chaque décennie avec un objectif de consommation d'énergie finale du parc réduite en 2050 d'au moins 60 % par rapport à 2010.

Dans le tertiaire (pour lequel une obligation de travaux de rénovation énergétique était déjà prévue dans la loi Grenelle 2 de 2010), cette exigence doit se traduire par un décret (en consultation fin octobre 2016) concernant les surfaces supérieures à 2000 m². Ce décret ajoute aux objectifs du Grenelle une obligation de réduction de consommation de 25 % à l'horizon 2020 (ou alternativement un seuil de consommation d'énergie primaire par m² et par an) et la fourniture d'un scénario de réduction de 40 % des consommations à l'horizon 2030. Aucune sanction n'est prévue dans le décret. Des alternatives sont possibles si les coûts sont excessifs (200€/m², et plus de 5 ans

¹²⁸ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-3.pdf

de temps de retour sur investissement, durée portée à 10 ans pour l'État et les collectivités territoriales).

L'article 3 de la LTECV dispose que : « *la France se fixe comme objectif de rénover énergétiquement 500 000 logements par an à compter de 2017 dont au moins la moitié est occupée par des ménages aux revenus modestes, visant ainsi une baisse de 15 % de la précarité énergétique d'ici 2020* ».

L'article 5 requiert la rénovation énergétique avant 2025 de tous les bâtiments privés résidentiels consommant plus de 330 kWh d'énergie primaire par an et par m², ce qui correspond aux bâtiments des classes F et G.

La trajectoire de la LTECV pour le bâtiment peut donc se résumer ainsi : élimination des bâtiments de classe F et G dès 2025, et élimination des autres classes B, C, D, E à l'horizon 2050.

Les mesures en faveur de ces objectifs sont détaillées *infra*.

3.2. La SNBC

La **SNBC**¹²⁹, déclinaison opérationnelle de la LTECV, précise le calendrier et prévoit pour le secteur résidentiel-tertiaire des efforts considérables en termes de réductions d'émissions. Partant d'une estimation d'émissions du secteur de 90 Mt CO₂ éq en 1990 et 99 Mt CO₂ éq en 2013, elle propose de passer à une moyenne annuelle de 76 Mt CO₂ éq sur la période 2015-2018, 61 Mt CO₂ éq sur la période 2019-2023 et 46 Mt CO₂ éq sur la période 2024-2028 soit plus de 20 % de baisse d'une période quinquennale à l'autre. Le secteur du bâtiment est ainsi celui dont les efforts requis sont les plus importants. L'argumentaire pour des « bâtiments bas-carbone » est le suivant.

« En 2013, les émissions directes du secteur résidentiel-tertiaire représentent 20% des émissions de GES (près d'un quart si on tient compte des émissions indirectes associées à la production d'électricité et de chaleur pour les bâtiments). Par rapport à 2013, l'objectif dans le scénario de référence est de parvenir à baisser ces émissions de 54% à l'horizon du troisième budget carbone et d'au moins 87% à l'horizon 2050. (...) Les différents leviers d'actions devront permettre d'atteindre une baisse de la consommation énergétique de 28% à l'horizon 2030 par rapport à 2010 et de réduire encore les émissions de gaz à effet de serre associées à la construction et à l'utilisation des bâtiments à long terme grâce à :

- la construction de bâtiments neufs aux performances énergétiques et environnementales élevées : la mise en œuvre des réglementations 2012 et celle d'une future réglementation basée sur une analyse en cycle de vie des impacts environnementaux du bâtiment permettront de réduire considérablement les émissions de GES tout au long de la vie des bâtiments ;*
- une massification de la rénovation énergétique, en agissant à la fois sur la rénovation de l'enveloppe et l'amélioration de l'efficacité énergétique et climatique des systèmes (ex. chauffage, eau-chaude sanitaire, cuisson...) afin de disposer d'un parc entièrement rénové aux normes "BBC rénovation" en 2050 ;*
.... »

¹²⁹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>

3.3. Engagements européens et internationaux de la France

Les engagements européens et internationaux de la France en matière de climat (paquets énergie climat européens, Accord de Paris de décembre 2015 signé lors de la COP21¹³⁰) sont cohérents avec ces deux éléments cadres nationaux (LTECV et SNBC).

Il en est de même pour les directives plus anciennes relatives à l'énergie, notamment la directive 2006/32/CE relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales¹³¹ remplacée par la directive 2012/27/UE¹³², et la directive 2010/31/UE d'efficacité énergétique des bâtiments¹³³, plus spécifique au secteur du bâtiment.

La directive relative à l'efficacité énergétique est générale, sur le sujet bâtiment, elle requiert notamment une stratégie nationale de rénovation et une rénovation énergétique de 3 % du parc public chaque année ou des dispositions aboutissant à des économies équivalentes. Cette directive demande aussi l'établissement de certificats d'économie d'énergie et d'audits énergétiques, la fourniture à conditions raisonnables de compteurs individuels mesurant avec précision la consommation d'électricité.

La directive d'efficacité énergétique des bâtiments « fixe des exigences en ce qui concerne: a) le cadre général commun d'une méthode de calcul de la performance énergétique intégrée des bâtiments et de leurs parties et des unités de bâtiment; b) l'application d'exigences minimales en matière de performance énergétique aux bâtiments neufs et à leurs parties et aux nouvelles unités de bâtiment; c) l'application d'exigences minimales en matière de performance énergétique des: i) bâtiments existants, unités de bâtiment et éléments de bâtiment lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants; ii) éléments de bâtiment qui font partie de l'enveloppe du bâtiment et ont un impact considérable sur la performance énergétique de cette enveloppe lorsqu'ils sont rénovés ou remplacés; et iii) systèmes techniques de bâtiment en cas d'installation, de remplacement ou de modernisation desdits systèmes; d) les plans nationaux visant à accroître le nombre de bâtiments dont la consommation d'énergie est quasi nulle; e) la certification de la performance énergétique des bâtiments ou des unités de bâtiment; f) l'inspection régulière des systèmes de chauffage et de climatisation dans les bâtiments; et g) les systèmes de contrôle indépendants pour les certificats de performance énergétique et les rapports d'inspection. ».

Elle fixe entre autres des exigences énergétiques minimales pour les bâtiments, demande l'établissement d'un système de certificats de performance énergétique, enjoint aux États membres de veiller à ce que tous les bâtiments neufs soient à consommation d'énergie quasi nulle en 2020 (2018 pour les bâtiments neufs publics).

¹³⁰ Sur le secteur spécifique du bâtiment, la COP21 a été l'occasion du lancement de l'« alliance mondiale pour les bâtiments et la construction, » avec laquelle la France a lancé à la COP22 un « programme efficacité énergétique dans les bâtiments » (PEEB), en vue de créer un fonds pour coordonner l'assistance technique et l'investissement dans l'innovation en efficacité énergétique dans le bâtiment. La France a aussi participé à l'élaboration d'une feuille de route mondiale sur la transition bas carbone du secteur immobilier, présentée à la COP22.

¹³¹ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=URISERV:l27057>

¹³² <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX:32012L0027>

¹³³ <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:FR:PDF>

4. Avancées, obstacles, pistes de progrès

Le rapport CGEDD de 2013 considère que l'atteinte des objectifs ambitieux dévolus au secteur du bâtiment ne suscite pas d'obstacle purement technique, mais plutôt des obstacles de nature économique (cf. considérations susmentionnées sur les coûts de rénovation), esthétique (arbitrage entre préservation du patrimoine et rénovation) et de pratique sociale (effet rebond).

Il mentionne aussi d'autres difficultés comme la prise en compte insuffisante de l'énergie grise, essentiellement contenue dans les travaux de construction et de rénovation, ce qui l'amène à recommander de favoriser la rénovation par rapport à la construction ; les écarts entre les économies d'énergie théoriques et celles réellement constatées, qui renvoient à l'efficacité des techniques d'amélioration ainsi qu'aux comportements des usagers et à l'effet rebond ; l'importance de l'énergie consommée dans les équipements et mobiliers internes au logement. On peut aussi mentionner parmi les obstacles les questions d'organisation des filières professionnelles, très éclatées, parfois insuffisamment formées à la rénovation et peu aptes à un approche plus « industrielle ».

Le rapport CGEDD de 2013 mentionne aussi l'enjeu de la production propre d'énergie (autoproduction / autoconsommation) dans les BEPOS (bâtiments à énergie positive¹³⁴) et leur généralisation ; et le rôle d'exemplarité des institutions publiques, à commencer par l'État.

D'autres sujets méritent encore examen. Par exemple, la démarche usuelle, centrée sur le seul bâtiment, peut être élargie en réfléchissant par exemple à l'équilibre entre logements en collectifs et individuels, l'ADEME considérant comme important d'infléchir cet équilibre en faveur des immeubles collectifs, moins consommateurs d'énergie (et d'espace) ; et l'intérêt d'une approche dépassant le bâtiment, en allant vers le quartier et, au-delà, le territoire où peuvent mieux se déployer des solutions de gestion en réseaux, de stockages d'énergie, de production d'énergie, etc.)

Les dispositions prises depuis 2013, dont les mesures annoncées par le gouvernement le 1^{er} juillet 2016¹³⁵ (mise en place d'un label « énergie-carbone » anticipant la future réglementation environnementale, lancement du programme « copropriétés positives ») ou l'ordonnance du 27 juillet relative à l'autoconsommation qui ouvre la porte à l'autoconsommation collective¹³⁶, permettent de surmonter certains de ces obstacles et de prendre en compte certaines de ces perspectives, mais des progrès sont encore nécessaires.

¹³⁴ Le terme « BEPOS », de plus en plus utilisé, y compris dans la communication gouvernementale, reste une marque : nommé « BEPOS – EFFINERGIE 2013 », il est l'un des quatre labels de l'association EFFINERGIE, créée en 2006 (voir <http://www.effinergie.org/web/>) ; de plus il ne correspond pas à des consommations négatives (et donc à de l'énergie positive au sens naturel du terme), mais plutôt à des consommations typiquement inférieures à 40 kWhEp/m²/an pour les postes réglementaires d'usage, compensées par de la production renouvelable.

¹³⁵ Voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/Segolene-Royal-et-Emmanuelle-Cosse_48041.html

¹³⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/ordonnance/2016/7/27/DEVR1615431R/jo/texte>,
<http://www.enr.fr/actualite/293/Publication-de-l-ordonnance-relative-a-l-autoconsommation-les-professionnels-saluent-un-texte-qui-ouvre-de-nouvelles-perspectives-pour-la-filiere-solaire>

4.1. Des avancées récentes

4.1.1. Un ensemble d'aides publiques pour surmonter les obstacles économiques

4.1.1.1. Bref parangonnage international

La démarche française est fondée sur une mobilisation publique importante, en particulier de diverses aides publiques, tant pour les particuliers que pour les institutions publiques (notamment via la CDC, Caisse des dépôts et consignations).

Les approches d'autres pays européens reposent moins sur les aides publiques.

Par exemple, la Suède s'est orientée vers un prix élevé de l'énergie (via une fiscalité lourde) et du carbone (taxe carbone de 125€ par tonne de CO₂, depuis 1991), tout en menant une politique déterminée de suppression des aides publiques. En matière de bâtiment, elle a fortement misé sur l'extension du chauffage urbain et sa décarbonation ([voir plus haut 3.1.1.1.](#)).

Les Pays-Bas, soutiennent des initiatives privées ne nécessitant aucune aide publique : c'est le cas de la démarche ENERGIESPRONG¹³⁷, qui tend à accompagner la généralisation d'une intervention industrialisée pour amener 100 000 logements sociaux à une autarcie énergétique complète (isolation extérieure + capteurs solaires et stockage individuel).

4.1.1.2. Situation française : la LTECV et la SNBC cadres des soutiens publics

En France, le titre II de la LTECV est dévolu à la rénovation des bâtiments et ses articles 8 et 14 évoque les aides publiques dont la SNBC précise le cadre et les objectifs (page 84 et 85) :

« Ces leviers d'actions peuvent se décliner par des mesures à appliquer sur les bâtiments neufs ou existants comme suit:

a. Accompanyer les maîtres d'ouvrage pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et la diminution des émissions de leur bâtiment

- Réduire les consommations et les émissions par des gestes simples (y compris la gestion active des consommations) en soutenant les initiatives visant à adopter des comportements vertueux notamment par des actions de communication et d'information*
- Inciter les ménages à la réalisation de travaux de rénovation énergétique, pertinents sur le plan environnemental, grâce au développement du service public de la performance énergétique au travers des plate-formes territoriales de la rénovation énergétique et au reploiement du Passeport rénovation énergétique*

¹³⁷ Voir <http://energiesprong.nl/> ou <http://www.energiesprong.eu/>

- *Inciter les gestionnaires de parc tertiaire, notamment les petites structures, à mener une stratégie d'investissement visant l'amélioration de la performance énergétique et la diminution des émissions de leur bâtiment*

b. Lever les barrières à l'investissement

- *Soutenir la rénovation énergétique des logements des ménages modestes, comme axe prioritaire de la politique de lutte contre la précarité énergétique*
- *Disposer d'un panel de dispositifs incitatifs complémentaires, simples et stables dans le temps*
- *Mobiliser les acteurs du secteur bancaire pour distribuer des outils de financement dédiés (tiers financement notamment)*
- *Créer et déployer le fonds de garantie pour la transition énergétique*
- *Pérenniser les dispositifs d'incitation pour le parc social*
- *Mobiliser les signaux prix (individualisation des frais de chauffage, assiette carbone dans le prix des énergies, ...). »*

En substance, la LTECV prévoit de nombreuses mesures en faveur des particuliers (création d'un cadre pour le tiers financement de travaux par des sociétés publiques, carnet numérique du logement, aides aux ménages modestes via le fonds de garantie pour la rénovation énergétique, information aux consommateurs via les compteurs intelligents Gazpar et Linky). Des actions immédiates en ce sens sont le crédit d'impôt transition énergétique (CITE) remboursant 30 % des travaux de rénovation énergétique avec plafond de 8 000€/personne et 16 000€ par couple, l'éco-prêt à taux zéro (EcoPTZ), des conditions de performance énergétique minimale s'appliquant aux logements sociaux vendus à des personnes physiques, le maintien des aides à la rénovation en cas d'obligation de travaux, le vote à la majorité simple des travaux de rénovation dans les copropriétés, les plates-formes de rénovation énergétique incluant les 450 points Rénovation Info Service couvrant le territoire, l'information des consommateurs sur leurs frais réels de chauffage et d'eau chaude sanitaire, etc.

Pour les collectivités et entreprises, la LTECV lève les freins à la rénovation énergétique des bâtiments (dérogation/simplification aux règles d'urbanisme avec par exemple la possibilité pour un plan local d'urbanisme -PLU- d'imposer aux constructions de couvrir une part de leur consommation d'énergie par la production d'énergie renouvelable, possibilité d'imposer des standards plus exigeants, ou la possibilité pour les PLU de réduire d'au moins 15 % le nombre de places de stationnement exigé habituellement en contrepartie de la mise à disposition de véhicules électriques en autopartage). Elle promeut des plates-formes territoriales, encourage les partenariats entre établissements publics à caractère scientifique, culturel et professionnel (universités, grandes écoles) et collectivités établissant un plan climat énergie territorial (PCET), et des constructions publiques exemplaires d'un point de vue énergétique et environnemental. De plus le fonds d'épargne de la Caisse des dépôts et consignations, d'un montant de 5 Mds €, finance à un taux avantageux les projets contribuant à la transition énergétique.¹³⁸

D'autres mesures d'application non immédiate requérant arrêtés et décrets sont entrées en vigueur ou encore en cours d'élaboration. Celles déjà adoptées incluent¹³⁹ le bonus de constructibilité (30 % de bonus sur les permis de construire pour les bâtiments peu consommateurs ou à énergie positive (arrêté du 12 octobre 2016), le

¹³⁸ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Mieux-renover-les-batiments-pour.html>

¹³⁹ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Avancement-des-mesures.html> et <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Module-de-suivi-de-la-loi-de.html>

décret du 19 août 2016 sur l'effacement des consommations d'électricité, le décret du 11 août sur le fonds de garantie de la rénovation énergétique (FGRE), la précision du cadre opérationnel des sociétés de tiers financement, le déploiement de compteurs intelligents (Linky et Gazpar), les obligations d'économies spécifiques à réaliser au bénéfice des ménages en situation de précarité énergétique, etc,

4.1.1.3. Les outils de soutien : CITE, Eco-PTZ, tiers financement, CEE

Pour accompagner les particuliers, plusieurs outils ont été mis en place, dont principalement : le crédit d'impôt transition énergétique (CITE), l'éco-prêt à taux zéro (Eco-PTZ), les sociétés de tiers financement (cf LTECV art. 23), les certificats d'économie d'énergie (CEE).

Le Crédit d'impôt pour la transition énergétique (CITE) concerne les travaux d'économies d'énergies et d'utilisation des énergies renouvelables : 30 % du montant des travaux (avec un plafond de dépenses) peut être subventionné pour les propriétaires occupants, sans conditions de ressources et de bouquet¹⁴⁰. Le CITE à 30 % est prolongé jusqu'au 31 décembre 2016. Les critères de performance de certains systèmes de chauffage (chaudière fioul, gaz, PAC, chauffe-eau solaire) sont modifiés. De plus, les capteurs solaires produisant de l'électricité et de la chaleur sont désormais inclus au CITE sous certaines conditions. À l'inverse, les éoliennes domestiques sont exclues.

L'Eco prêt à taux zéro (Eco-PTZ¹⁴¹) permet d'emprunter de l'argent sans payer de taux d'intérêt. Le remboursement est étalé sur 15 ans maximum et jusqu'à 30 000 € peuvent être débloqués, soit une mensualité s'élevant à environ 166 €. En comparaison, emprunter 30 000 € sur 15 ans à 0 % d'intérêt plutôt qu'à 3 % permet une économie de plus de 7 000 € de taux d'intérêt. L'Eco-PTZ est prolongé jusqu'en 2018 et ses critères de performance sont alignés sur ceux du CITE. Un Eco-PTZ simplifié est désormais accessible pour les propriétaires éligibles aux aides de l'ANAH. En copropriété, un Eco-PTZ spécifique¹⁴² permettra d'enclencher des travaux ambitieux (il a par ailleurs été simplifié sur certains critères).

Depuis le 1er mars 2016, il est désormais possible pour tous les ménages de cumuler le crédit d'impôt transition énergétique et le prêt à taux zéro, sans conditions de ressources.).

Ces dispositifs viennent compléter un dispositif existant depuis 2006 : les certificats d'économies d'énergie (CEE), ou certificats blancs¹⁴³. Ce dispositif innovant et hybride oblige les fournisseurs d'énergie (dits « obligés ») à réaliser un certain volume d'économies d'énergie par « période »¹⁴⁴ grâce à des opérations dont une liste éligible est établie par l'État. Les « obligés » agissent par le biais de sensibilisation, d'aides, et d'accompagnement auprès des consommateurs. Les économies sont reconnues par

¹⁴⁰ pour le détail des travaux éligibles, voir par exemple : http://www.infoenergie69-grandlyon.org/IMG/pdf/eco-ptz_2016.pdf

¹⁴¹ Voir par exemple : http://www.infoenergie69-grandlyon.org/IMG/pdf/eco-ptz_2016.pdf

¹⁴² Voir par exemple : http://www.infoenergie69-grandlyon.org/IMG/pdf/ecoptz_collectif_2015-2.pdf

¹⁴³ <http://www.ademe.fr/certificats-deconomie-denergie-dispositif-2015-2017>

¹⁴⁴ Pour mémoire : 54 TWh « cumac » (cumulé et actualisé sur la durée de vie du produit) en 1^{re} période de mi 2006 à mi 2009 ; 460 TWh cumac sur la seconde période 2011-2014 ; 700 TWh cumac sur la 3^e période 2015-2018 + 150 TWh cumac pour la précarité énergétique.

des certificats (les CEE), échangeables sur un marché (prix typique 4€/MWh). Un rapport de 2014¹⁴⁵ (CGE, CGEDD, IGF) conclut à leur intérêt, en préconisant des améliorations :

« La mission d'évaluation économique du dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE) a pu constater l'importance des CEE dans la politique d'efficacité énergétique nationale, renforcée par les choix faits par la France dans sa notification au titre de la directive européenne dite « efficacité énergétique ». Elle a cherché à mesurer l'effet du dispositif des CEE sur la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel. Les outils publics d'efficacité énergétique ont eu un effet inférieur à l'impact attendu sur la consommation finale. La mission considère que le dispositif des CEE présente des avantages par rapport au crédit d'impôt développement durable et à la TVA à taux réduit et recommande de le faire évoluer. Trois principales mesures seraient à mettre en place : une révision des fiches standardisées, afin que chaque CEE délivré corresponde bien à une économie d'énergie ; une meilleure information du particulier sur la pertinence des différentes opérations d'efficacité énergétique et leur retour sur investissement ; un meilleur ciblage du dispositif. La mission propose de tester deux outils de ciblage des CEE, le passeport énergétique et une action particulière sur les bâtiments les plus énergivores durant la période 2015-2017, en vue de leur généralisation éventuelle. ». Pour mémoire, le passeport énergétique des bâtiments a été annoncé par le Premier ministre le 21 septembre 2013 à l'issue de la seconde conférence environnementale, en même temps que la diminution de la TVA pour les travaux de rénovation énergétique, la création d'un fonds national de garantie de la rénovation thermique, la simplification du CIDD et de l'éco-PTZ, le déploiement de compteurs intelligents, le renforcement du rôle des collectivités locales et de la formation.

La Cour des Comptes pour sa part, dans son rapport public annuel de 2016¹⁴⁶, juge que suite à son propre rapport de 2013, *« Les certificats d'économies d'énergie participent aujourd'hui activement à la réduction de la consommation d'énergie. Si leur efficacité s'est progressivement améliorée ces dernières années, il n'en reste pas moins nécessaire d'évaluer périodiquement ce dispositif et d'en renforcer le contrôle. ».* De fait le dispositif est peu coûteux, socialement accepté, et efficace : 612 TWh économisés depuis l'origine des CEE (dont 1,2 Mtep économisée par les ménages en 2012 par exemple), qui ont *« contribué à financer des travaux d'économies d'énergie à hauteur de 24 Md € et ont entraîné 2 Md € d'économies annuelles pour les consommateurs, selon la DGEC ».* *« Depuis 2011, les principales actions portent sur l'installation d'un million de chaudières individuelles, le remplacement de chaudières collectives pour 400 000 appartements, l'installation de 480 000 appareils de chauffage à bois, de 116 000 pompes à chaleur, de 45 millions de m² d'isolant, de plus de trois millions de fenêtres à vitrage isolant ou encore 250 000 luminaires d'éclairage public rénovés. »*

Tous ces dispositifs coexistent. L'article 14 de la LTECV prévoit la remise du Gouvernement au Parlement d'un *« rapport sur les moyens de substituer à l'ensemble des aides fiscales attachées à l'installation de certains produits de la construction une aide globale dont l'octroi serait subordonné, pour chaque bâtiment, à la présentation d'un projet complet de rénovation, le cas échéant organisé par étapes, réalisé par un conseiller à la rénovation certifié sur la base de l'étude de faisabilité mentionnée au 2o du même article et un rapport sur la nécessité d'effectuer une évaluation de la*

¹⁴⁵ Voir http://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/cgedd/009574-01_rapport.pdf

¹⁴⁶ <https://www.ccomptes.fr/content/download/89514/2121217/version/1/file/03-certificats-economies-energie-RPA2016-Tome-2.pdf>

performance énergétique des travaux réalisés. ». La mission pour ce rapport demandé par l'article 14 de la LTECV, a été lancée à l'automne 2016.

4.1.1.4. Mesures complémentaires pour les ménages modestes et contre la précarité énergétique

Ces soutiens d'ordre général sont complétés et renforcés pour les ménages modestes et très modestes, dans une volonté de lutter contre la précarité énergétique.

La LTECV renvoie à un arrêté ministériel la traduction concrète de la notion de précarité, via son article 30, créant l'article L221-1-1 du code de l'énergie : « un ménage est considéré en situation de précarité énergétique lorsque son revenu fiscal de référence est, compte tenu de la composition du ménage, inférieur à un plafond fixé par arrêté du ministre chargé de l'énergie ».

Le dernier arrêté correspondant est du 30 décembre 2015¹⁴⁷. Il dispose que :

« Un ménage est considéré en situation de précarité énergétique si ses revenus sont inférieurs aux plafonds suivants :

NOMBRE DE PERSONNES composant le ménage	PLAFONDS DE REVENUS du ménage en Île-de-France (€)	PLAFONDS DE REVENUS du ménage pour les autres régions (€)
1	24 107	18 342
2	35 382	26 826
3	42 495	32 260
4	49 620	37 690
5	56 765	43 141
Par personne supplémentaire	+ 7 136	+ 5 434

Un ménage est considéré en situation de grande précarité énergétique si ses revenus sont inférieurs aux plafonds suivants :

NOMBRE DE PERSONNES composant le ménage	PLAFONDS DE REVENUS du ménage en Île-de-France (€)	PLAFONDS DE REVENUS du ménage pour les autres régions (€)
1	19 803	14 308
2	29 066	20 925
3	34 906	25 166
4	40 758	29 400
5	46 630	33 652

¹⁴⁷ <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2015/12/30/DEVR1525965A/jo/texte>

Par personne supplémentaire	+ 5 860	+ 4 241
-----------------------------	---------	---------

Les revenus pris en compte correspondent à la somme des revenus fiscaux de référence mentionnés sur les avis d'imposition ou de non-imposition au titre de l'année N-2 par rapport à la date de référence définie ci-après pour les personnes composant le ménage. »

La lutte contre la précarité énergétique (définie dans l'article 19 de la LTECV) est soutenue par diverses dispositions : le programme « Habiter mieux » de l'ANAH¹⁴⁸ (et son aide de solidarité écologique (ASE), via le fonds d'aide à la rénovation thermique (FART)¹⁴⁹ ; les divers soutiens à l'auto réhabilitation accompagnée (ARA)¹⁵⁰ ; le soutien à diverses initiatives comme celle de la Fondation Abbé Pierre¹⁵¹ ; les tarifs sociaux d'électricité (TPN / tarif de première nécessité) et de gaz (TSS / tarif spécial de solidarité) ou le « chèque énergie » (encadré par l'article 201 de la LTECV).

De plus et comme vu plus haut le dispositif des CEE a récemment fait l'objet, sur sa troisième période 2015-2018, d'un objectif complémentaire d'économies d'énergie à hauteur de 145 TWh cumulés et actualisés (cumac).

Enfin, la loi ouvre à chaque conseil régional la possibilité de s'investir fortement, via un programme régional pour l'efficacité énergétique (cf. LETCV art. 188)

4.1.2. Vers une réglementation thermique plus ambitieuse en 2018, concertée sur la base du cycle de vie et du label « énergie-carbone »

Le 1^{er} juillet 2016, les ministres en charge de l'Énergie et de l'Habitat durable ont présenté le lancement de l'expérimentation pour conduire à une nouvelle réglementation technique plus ambitieuse, pour aller vers des bâtiments tant à énergie positive qu'à faible empreinte carbone : « BEPOS + carbone »¹⁵². Cette démarche concertée, techniquement complexe, est issue en particulier des travaux du Plan Bâtiment Durable¹⁵³ et de son groupe de travail « RBR 2020-2050 / réflexion bâtiment responsable 2020 – 2050 », du conseil supérieur de la construction et de l'efficacité énergétique (CSCEE, créé par la LTECV¹⁵⁴) et des réflexions pour une performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs (PEBN), avec un pilotage dynamique des services centraux du ministère, en liaison avec l'ADEME, le CSTB, et autres acteurs.

Cette démarche va au-delà du simple fonctionnement du bâtiment. Elle prend en compte l'ensemble du cycle de production et vie d'un bâtiment (avec en particulier l'incitation à utiliser des matériaux biosourcés et recyclables), ainsi que tous ses usages. Elle intègre l'autoproduction-autoconsommation, mais aussi de la production

¹⁴⁸ Voir : <http://www.anah.fr/proprietaires/proprietaires-occupants/etre-mieux-chauffe/>

¹⁴⁹ Voir : <http://www.quelleenergie.fr/aides-primes/aides-anah/habiter-mieux>

¹⁵⁰ Voir, par exemple : <http://www.compagnonsbatisseurs.org/index.php?lg=fr&id=311>

¹⁵¹ Comme « toits d'abord » : <http://www.fondation-abbe-pierre.fr/toits-dabord>

¹⁵² Voir : http://www.logement.gouv.fr/IMG/pdf/2016_07_01_dp_orientationsbatiment.pdf

¹⁵³ <http://www.planbatimentdurable.fr/reflexion-batiment-responsable-2020-r142.html>

¹⁵⁴ Le CSCEE a été créé par décret du 27 novembre 2015 (voir : https://www.legifrance.gouv.fr/jo_pdf.do?numJO=0&dateJO=20151129&numTexte=22&pageDebut=22155&pageFin=22156).

locale d'énergie (y compris via des réseaux de chaleur), dans une optique de plus fort recours aux énergies renouvelables : solaire, bois-énergie, géothermie, etc. Elle souhaite être plus visible via la création d'un label unique « énergie – carbone ».

**Renforcer l'autoconsommation sur tous les usages
et produire dans un cadre territorial – Bonus de constructibilité – bât.
publics exemplaires**



Source : http://www.logement.gouv.fr/IMG/pdf/2016_07_01_dp_orientationsbatiment.pdf

Cette nouvelle politique marque une étape, dont le succès repose sur son appropriation par les acteurs, notamment professionnels, et sur une forte mobilisation des territoires. Les ministres ont souhaité accélérer le calendrier, en prévoyant un aboutissement vers une nouvelle réglementation environnementale dès 2018 au lieu de 2020. La mise en place et l'évaluation concertée, sous la houlette du CSCEE¹⁵⁵, d'expérimentations « BEPOS + carbone », contribueront à cette appropriation.

4.1.3. Quelques évolutions législatives et réglementaires pour surmonter les obstacles urbanistiques

La LTECV (notamment avec ses articles 3, 7, 8, etc.), et ses divers décrets d'application (comme les récents décrets des 15 et 28 juin 2016), ont permis de desserrer les contraintes du droit de l'urbanisme, pouvant faire obstacle au déploiement de ces nouveaux types de bâtiments : dérogations de limites de constructibilité (« bonus de constructibilité » de + 30 % pour un BEPOS), de hauteur et volume, etc.

¹⁵⁵ Le CSCEE, placé auprès du ministre en charge de la construction, comporte cinq collègues (parlementaires, collectivités territoriales, professionnels, associations, personnes qualifiées) et a, notamment, pour mission de donner des avis sur « la réglementation technique et les exigences applicables aux bâtiments, notamment celles concernant leur performance énergétique et environnementale » et « la réglementation technique des produits et matériaux de construction » (voir <http://www.logement.gouv.fr/conseil-superieur-de-la-construction-et-de-l-efficacite-energetique-cscee>).

Par contre le décret du 30 mai 2016¹⁵⁶ relatif aux travaux d'isolation en cas de ravalement de façades, a été l'objet de critiques de la part d'associations de protection du patrimoine et peut être sujet à révision.

4.1.4. Comportements, pratiques sociales, accompagnement

De nombreux rapports, analyses, groupes de travail ont relevé l'importance des comportements, qu'il s'agisse du comportement de l'utilisateur ou du comportement des propriétaires de bâtiment confrontés à la décision de passer à l'acte de rénovation. L'insuffisance de prise en compte de cet aspect dans les politiques publiques peut en limiter l'impact et l'efficacité.

De premières mesures permettent d'espérer certaines évolutions positives.

4.1.4.1. L'enjeu majeur des comportements

Divers facteurs influencent le comportement d'un acteur :

- les facteurs décisionnels, en distinguant, en matière d'habitat, les particuliers, les copropriétés et les organismes bailleurs sociaux, pour passer à l'acte de construire et/ou de rénover ;
- la complexité des démarches nécessaires à la rénovation énergétique, depuis les aspects techniques jusqu'au suivi de la réalisation, en passant par les montages administratifs et financiers ;
- la facilité de faire une rénovation partielle ;
- l'effet rebond ;
- la prise en compte des aspects esthétiques et patrimoniaux ;
- etc.

Les développements suivants explorent ces facteurs.

Aspects sociologiques

Les évolutions sociales peuvent avoir des impacts importants sur les taux d'occupation, les manières d'habiter, avec des conséquences directes sur les consommations d'énergie et les émissions de GES.

Les perspectives de remontée du taux d'occupation liées à la location entre particuliers à court terme (de type « airbnb »), au développement de la co-location, à la densification d'occupation des bureaux peuvent avoir un impact positif en termes d'émissions du secteur bâtiment et méritent l'attention ; de telles hypothèses sous-tendent d'ailleurs certains scénarios comme vu *supra* et facilitent ainsi l'atteinte des objectifs.

Nouvelles technologies de l'information et de la communication

Il en va de même des sujets de l'usage des NTIC pour changer les comportements de manière acceptable: outre les compteurs intelligents de type Linky et Gazpar, le smartphone, le thermostat intelligent et connecté, ainsi que par exemple le chauffage connecté (notamment avec les technologies peu coûteuses de type très bas débit à

¹⁵⁶ <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2016/5/30/LHAX1613394D/jo>

bas coût de type Sigfox, avec des composants à moins d'un euro pièce et une batterie durant plusieurs années), peuvent également permettre des évolutions significatives des comportements de chauffage ou de climatisation, sans changer la valeur apportée aux personnes sur le plan du confort thermique. Ces outils viendront compléter rapidement les nouveaux compteurs intelligents et les dispositions de la LTECV en faveur d'une individualisation des consommations, dans une optique de responsabilisation des habitants consommateurs d'énergie.

Le bilan complet du déploiement des NTIC en termes d'émissions reste à établir. Les NTIC permettent des gains et optimisations (moindres déplacements, équilibrage des réseaux, domotique, effacement) mais sont cause du comportement dynamique à la hausse des consommations d'électricité spécifique dans les bâtiments, leur part dans les consommations devient significative, et de plus les nouveaux usages qu'elles permettent (commerce internet et livraisons à domicile par exemple) peuvent en fin de compte accroître les consommations et émissions.

Le cas particulier de l'autoconsommation

L'autoconsommation est une pratique qui se développe, entre autres en parallèle avec la diffusion des énergies renouvelables.

Elle a notamment donné lieu à un groupe de travail lancé en décembre 2013, et à un « rapport sur l'autoconsommation et l'autoproduction de l'électricité renouvelable »¹⁵⁷, publié en décembre 2014 par la DGEC.

Le « Panorama énergies-climat / édition 2015 »¹⁵⁸, publié par le ministère en charge de l'Énergie, rappelle les enjeux en termes de comportement et de gestion: *« L'autoconsommation peut se définir comme le fait de consommer sa propre production d'électricité. Elle est associée à la notion d'autoproduction, qui est le fait de produire sa propre consommation. Ces deux notions recouvrent des comportements différents. Augmenter l'autoconsommation peut conduire à augmenter sa consommation au moment où l'installation produit, ce qui peut entraîner des effets contraires à la politique d'efficacité énergétique et de maîtrise de la consommation d'énergie mais réduire les quantités injectées sur le réseau. A contrario, augmenter l'autoproduction peut conduire à mieux maîtriser et réduire la consommation et à augmenter la production d'énergie renouvelable. Elle peut toutefois engendrer des contraintes d'injection sur le réseau. »*¹⁵⁹. Il présente ensuite les conclusions du groupe de travail sur l'autoconsommation: *« Du point de vue de la collectivité, l'autoconsommation / autoproduction peut permettre d'améliorer l'intégration des énergies renouvelables au système électrique si elle conduit à réduire les quantités d'électricité injectées ou soutirées du réseau électrique . (...) Du point de vue du consommateur, l'autoconsommation/autoproduction peut lui permettre de faire des économies en réduisant sa facture d'électricité. (...) L'autoconsommation/autoproduction entraîne des transferts de charge entre les autoconsommateurs et les autres consommateurs (...) Certains profils de consommateurs sont plus adaptés à l'autoconsommation »*. Les recommandations sont un bon dimensionnement des installations, l'optimisation et la synchronisation des profils locaux de production et de consommation, un encadrement afin d'éviter les

¹⁵⁷ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_autoconsommation.pdf

¹⁵⁸ http://www.ladocumentationfrancaise.fr/docfra/rapport_telechargement/var/storage/rapports-publics/154000517.pdf

¹⁵⁹ Fiche 24, page 9, voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Panorama_energie_climat_2015_complet_mis_a_jour_le_26_aout_2015_2_.pdf

perturbations du modèle de rémunération du système électrique. L'habitat résidentiel diffus est cependant jugé peu pertinent pour le modèle d'autoproduction/autoconsommation, hors « îlots urbains » c'est-à-dire bâtiments collectifs, groupes de bâtiments ou quartiers, ou encore dans le cas de puissances faibles ; par contre ce modèle est jugé adapté aux secteurs industriels, tertiaires, agricoles, et aux zones non interconnectées (ZNI). Le rapport propose aussi des expérimentations à des puissances diverses de part et d'autre de 100 kWc, sur les cibles précitées.

Les motivations du passage à l'acte de rénover

Malgré les textes nombreux et les efforts d'incitation à passer à l'acte de rénover « vert », la rénovation énergétique massive des bâtiments existants tarde à décoller ([voir plus haut 2.1.3](#)). D'où la question : quel intérêt trouve un acteur (particulier, copropriété, bailleur social, investisseur immobilier, etc.) à investir dans la rénovation énergétique, à mieux gérer en économie d'énergie, etc. ? Qu'est-ce qui motive la décision de faire, le passage à l'acte ?

L'efficacité des signaux prix peut être diminuée par la volatilité des prix de l'énergie (comme récemment avec la baisse des prix des hydrocarbures) qui donne une faible visibilité à moyen et long termes.

La complexité de l'offre, ou des modes de décision (par exemple dans les copropriétés) peut aussi être un obstacle au passage à l'acte.

Par exemple, comme vu *supra*, l'approche par l'isolation totale par l'extérieur, certes prometteuse par la massification qu'elle peut apporter, peut se heurter à des questions d'acceptabilité en raison de considérations esthétiques, par exemple dans le cas de bâtiments non classés par des dispositifs réglementaires (monuments historiques, périmètre Architecte des bâtiments de France,...) mais dont les éléments décoratifs de façade sont appréciés.

Par ailleurs une rénovation thermique n'apporte pas forcément le confort : un bâtiment bien isolé élimine les fuites qui permettent parfois au bâtiment de « respirer », avec des problèmes corollaires à résoudre en termes de ventilation.

Un programme ambitieux de rénovation, si l'on veut qu'il puisse atteindre le niveau voulu de résultats, doit prendre en compte ces facteurs. Sont importants tant le plan technique que l'acceptabilité¹⁶⁰.

On peut aussi citer une réflexion de l'association « La Fabrique Écologique »¹⁶¹, à laquelle avait participé, à titre personnel, un des rapporteurs du rapport CGEDD de 2013 : « le défi de la rénovation énergétique des logements – comment amplifier le passage à l'acte des ménages ? » (2014¹⁶²). Elle conclut par quelques propositions : « *développer une forte logique de marque, généraliser des « carnets de santé » des logements, constituer des réserves financières pour les travaux de rénovation et introduire un mécanisme contraignant pour les passoires thermiques qui posent des problèmes de santé publique.* » (voir *infra*)

¹⁶⁰ Par exemple, une rénovation peut être l'occasion d'envisager des façades nouvelles, certes plus onéreuses, mais plus décorées. Certaines villes lancent des concours de décoration de façade, ce qui peut constituer une incitation.

¹⁶¹ Voir <http://www.lafabriqueecologique.fr/>.

¹⁶² Voir http://media.wix.com/ugd/ba2e19_68dc071767bd4020a54b2bdfd7ba670a.pdf, mais aussi http://media.wix.com/ugd/ba2e19_2f5e5f30bcb141dfa60313826916e539.pdf.

On peut aussi se référer aux éléments du rapport de 2013 du Conseil économique pour le développement durable, « la rénovation des bâtiments – politiques publiques et comportements privés »¹⁶³. Ce rapport insiste surtout sur les enjeux économiques : « *la mobilisation de ces bénéfices [de la rénovation énergétique] nécessite un certain nombre de conditions qui ne sont pas techniques mais économiques, notamment sur l'orientation des opérations d'investissement, sur la professionnalisation des filières pour maîtriser les coûts et la qualité, et pour assurer l'émergence de modèles privés.* »

L'importance de la communication

La motivation peut se renforcer par un contact direct avec chaque acteur à sensibiliser. Il existe des lieux d'information très utiles, comme le sont les espaces d'information énergie (EIE). Il est aussi possible d'aller au-devant des acteurs.

L'expérience ancienne des OPAH (opérations programmées d'amélioration de l'habitat) montre qu'une animation dynamique, avec des démarches de contacts proactives permettent de mobiliser beaucoup de personnes. On peut citer une des expériences saluées par les ministères concernés : le programme du Pays « Ardèche Verte »¹⁶⁴.

Extrait d'un entretien avec le directeur du PACT de l'Ardèche (aujourd'hui SOLIHA¹⁶⁵), David Magnier :

Un PIG lancé a été en 2012, porté par le Pays de l'Ardèche Verte (soutenu par le Conseil Régional Rhône-Alpes), relayant les actions des communautés de communes (qui financent). Le PACT anime le dispositif (communication, permanences d'information, montage des dossiers, suivi et relations avec les partenaires, dont élus, artisans, professionnels de l'immobilier, travailleurs sociaux, ...). Il y avait eu au préalable une étude (pilotee par la collectivité, travail en interne) qui avait permis de quantifier les enjeux quantitatifs, et caler les principales problématiques (énergie, insalubrité, maintien de personnes à domicile, ...). L'action de communication a été exemplaire et primée au niveau national.

Le projet va durer cinq ans. L'idée était de porter 100 dossiers par an, dont 80% pour les aspects énergie. En 2013, 66 dossiers, dont 38 pour l'aspect énergie. En 2014, 160 dossiers, dont 125 pour l'aspect énergie. En clair, très fort succès : dès 2015, plus de 330 demandes !

Le marché du PACT porte sur deux aspects : une partie fixe animation (43 000 € par an), une partie variable en rémunération de dossier (avec forfait par type de dossier, avec un versement – 60%- au dépôt du dossier à l'ANAH, et le solde à la fin de l'opération pour le propriétaire). Pour la partie variable, hypothèse initiale est d'environ 95 000 €/an.

La moyenne de travaux par dossier est de 3 600 € HT, avec environ 58% d'aides.

¹⁶³ Voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Renovation_energetique.pdf

¹⁶⁴ Voir : <http://www.pays-ardeche-verte.fr/habiter-mieux/>

¹⁶⁵ Voir : <http://www.logement07.fr/programme/07/>

La moyenne de gain en économie énergie est de 40%.

Les principales interventions portent sur les isolations sous toiture, la reprise du chauffage (souvent, basculement du fioul au bois), et parfois l'isolation des ouvrants, voire (rarement) l'isolation des murs (plutôt par l'extérieur sur des bâtis récents des années 1970).

Concrètement, un particulier contacte, ou est contacté par, le chargé d'opération PACT installé localement. La visite sur place permet de faire le diagnostic (analyse du bâti, et utilisation d'un logiciel de simulation) et de caler le projet de travaux. Cette étape est gratuite pour le particulier (puisque payée dans le programme par la collectivité, avec aide ANAH). Un guide CAPEB des artisans mobilisables est remis. Sur ces bases, un dossier est établi, avec les devis correspondants.

À l'instar de cet exemple, de nombreuses réussites rapportées par l'ADEME s'appuient sur ce temps indispensable de contact direct à domicile avec le propriétaire (particulier ou copropriété), dès le départ, avec diagnostic énergétique, mobilisation d'une caméra de thermographie, conseils sur les travaux à mener, etc., puis aide au montage technique, administratif et financier. Cet appui est souvent maintenu après travaux, jusqu'à trois ans après¹⁶⁶, pour un suivi pédagogique de formation à la gestion et à l'utilisation de ce nouvel outil qu'est le logement rénové énergétiquement (comportements, adaptation et réglage des régulations, etc.).

L'artisan ou l'entreprise (59%), puis l'entourage (37%) sont selon certains échantillons statistiques les sources d'information les plus importantes devant le déclenchement des travaux, devant les magasins spécialisés (16%), les points rénovation info service (7%), le fournisseur d'énergie (5%), l'architecte (2%), le bureau d'étude (1%)¹⁶⁷.

¹⁶⁶ Comme pour le PASS'RENO HABITAT 93, la plateforme mise en place le Conseil départemental et des collectivités de Seine-Saint-Denis : voir <http://www.passrenohabitat93.energissime.fr/>

¹⁶⁷ chiffres clés 2015 climat air énergie, ADEME, p. 74, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

86 % des ménages ayant mené des travaux OPEN* ont consulté au moins une de ces sources avant de réaliser les travaux



Source utilisée
Source privilégiée

Autre source : 13 / 6

Aucune source d'information : 14 %

* Le périmètre «travaux OPEN» contient les travaux de rénovation présentant un potentiel d'amélioration énergétique du logement (postes concernés: eau chaude sanitaire, chauffage, toiture, mur, ouverture)

Source : Campagne OPEN 2015 sur travaux 2014 - TNS Sofres, Énergies Demain - février 2016
Champ : France métropolitaine

Sources d'information les plus influentes avant la réalisation des travaux – source, les chiffres clés 2015 climat air énergie, ADEME, p. 74

<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

L'importance de l'accompagnement : vers de nouveaux métiers de conseil

Au-delà des actions spécifiques menées par les collectivités territoriales, on peut anticiper le développement d'un nouveau métier de conseiller énergie¹⁶⁸ (à l'instar des entreprises de contrôle sécurité automobile), ou au moins de qualifications supplémentaires accessibles aux acteurs du bâtiment : architectes, géomètres, voire artisans, etc. Il faut toutefois prévoir la prise en charge, au moins en avance sur travaux, de la dépense correspondante, notamment pour le diagnostic initial, déclencheur de la décision. On ne compte en effet que quelques dizaines de conseillers énergies en France, face à au moins plus de 25 000 architectes et maîtres d'œuvre (auxquels les particuliers font d'ailleurs rarement appel pour la rénovation).

C'est une voie sur laquelle s'est notamment engagée l'Allemagne, dans son triptyque d'actions en faveur de la rénovation énergétique : informer, réglementer, inciter¹⁶⁹.

L'Allemagne a mis en place un dispositif d'autodiagnostic en ligne (un « configurateur »¹⁷⁰), qui permet d'évaluer les besoins en rénovation énergétique :

¹⁶⁸ Des formations existent, comme : <http://formations.itga.fr/l-accompagnement/conseiller-en-economie-d-energie.html>

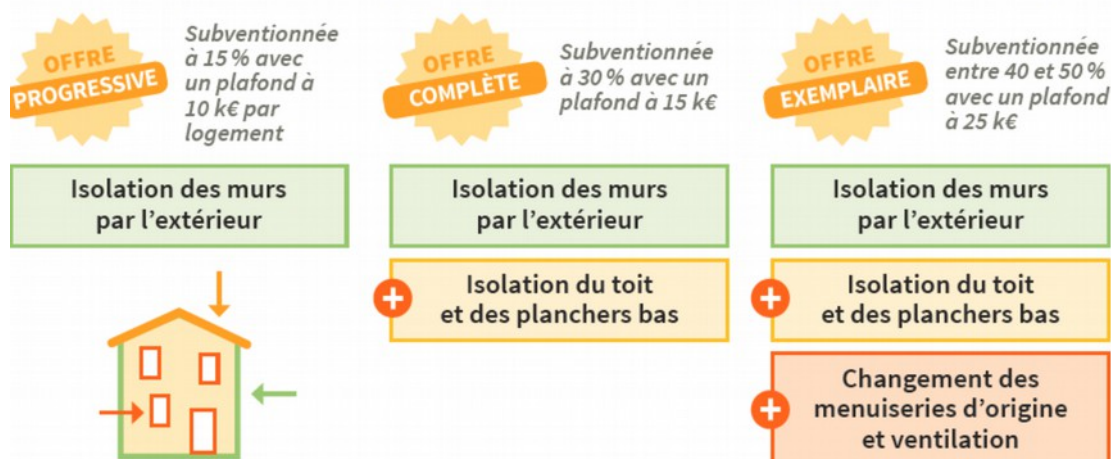
¹⁶⁹ Voir, déjà cité : enquête de la DG Trésor, via huit services économiques auprès d'ambassades de France, dans huit pays, janvier 2014, voir http://intra.daei.sg.i2/IMG/pdf/Rapport_ECI_performance_energetique_des_batiments_cle012c8c.pdf

selon les informations communiquées en ligne, de premiers conseils de travaux à entreprendre pour améliorer la performance énergétique ainsi que des liens vers les programmes et contacts sont proposés. Le conseil est assuré par des professionnels certifiés. Ainsi l'État fédéral a établi en 2011 une liste recensant les conseillers en matière de performance énergétique des bâtiments.

Le Ministère de l'économie allemand (BMWi) a également mis en place un programme spécifique pour cofinancer les conseils en économies d'énergie délivrés par des experts : le programme de conseil en économie d'énergie dans les quartiers périphériques (Energiesparberatung Vor-Ort). La clef d'entrée du mécanisme incitatif est le programme de conseil en énergie qui permet aux porteurs de projet de faire réaliser un diagnostic des travaux à entreprendre en vue d'atteindre les standards labellisés de la KfW (pour rappel, standards plus élevés que la réglementation thermique). Ce programme est géré par une agence fédérale relevant du ministère de l'Économie allemand (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle). Il s'adresse à des bâtiments dont au moins 50% de la surface est habitable. Pour les conseils en rénovation, la prise en charge des coûts d'élève à 50% (pour une somme ne dépassant pas 500 euros). Les conseils en économies d'énergie sont formulés par des consultants qualifiés. Ils doivent conduire à une rénovation d'un bâtiment répondant aux critères techniques de la KfW.

Ce conseil en énergie peut être conforté par des aides incitant à des approches globales de rénovation : c'est l'objectif, par exemple, de la démarche MUR-MUR de la Métropole de Grenoble (décrite dans la brochure ADEME de septembre 2016 présentant diverses expériences de rénovation énergétique de l'habitat¹⁷¹), dont les priorités d'intervention auprès des copropriétés sont ici illustrées :

MONTANT DES AIDES SELON L'OFFRE DE TRAVAUX SOUSCRITE PAR LA COPROPRIÉTÉ :



Source : « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016

Le moment privilégié de la mutation et l'importance du passeport énergétique

¹⁷⁰ Voir : <http://www.sanierungskonfigurator.de/start.php>

¹⁷¹ « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016

La mutation est un moment privilégié pour faire des travaux.

Au moment de la mutation, si des informations suffisantes sont données à l'acquéreur, il devient plus prêt à faire des travaux d'adaptation avant emménagement, et est plus en mesure d'y intégrer les travaux énergétiques. C'est un enjeu du « carnet de santé » ou « carte vitale » du bâtiment proposé par le Plan Bâtiment Durable, avatar possible du « passeport efficacité énergétique ». D'ores et déjà, différentes informations sont devenues obligatoires à la vente (voire à la location) : risques majeurs, termites, amiantes, etc. L'obligation d'un DPE vient utilement compléter cet ensemble.

C'est donc l'idée du « passeport de rénovation énergétique » du bâtiment cité dans la SNBC (page 84) et du carnet de santé du bâtiment mentionné plus haut. Le ministère en charge de l'Énergie a lancé fin 2015 une expérimentation dans une dizaine de territoires¹⁷², le passeport comprenant : un diagnostic complet avant travaux, des préconisations, les résultats après travaux.

Ce passeport aura toute sa place dans le carnet numérique d'un bâtiment (tel que lancé aujourd'hui en construction neuve). L'enjeu reste la traçabilité de ces données et l'objectif horizon à se donner : ambitieux, BBC, voire BEPOS en 2050.

Certains préconisent d'en faire un outil incitatif à la recherche, éventuellement progressive, d'un objectif optimal de rénovation complète. On peut en effet imaginer un système de points ou bonus¹⁷³, permettant de garder en mémoire chaque « geste » de rénovation (sous certification d'un tiers, par exemple un intervenant RGE ou un conseiller énergie). Le bonus pourrait se trouver dans une adaptation du CITE.

Les questions de coût, de financement, de réalisation et de garantie restent à préciser. Un bon document complet peut atteindre un coût assez élevé (de l'ordre de 1 000€), avec appel à un professionnel à définir (architecte, conseiller énergie, groupement labellisé RGE....).

L'effet rebond

Après la décision et une fois les travaux réalisés, les objectifs d'économie ne sont pas nécessairement atteints, notamment parce que les comportements évoluent : c'est ce qu'on appelle l'effet rebond ; par exemple, avec une bonne isolation, l'usager peut vouloir se chauffer plus car se chauffer devient enfin efficace, ce qui peut revenir à augmenter à terme la consommation énergétique. Il existe aussi, outre l'effet « rebond », un effet « prébond » lié à la méconnaissance du système à rénover et/ou de ses conditions de fonctionnement finales.

On constate que les occupants ayant amélioré la performance énergétique de leurs locaux augmentent en général leur niveau de confort (par exemple en augmentant la température), neutralisant une partie de l'économie théorique : c'est ce phénomène qui est appelé « effet rebond ». Plus généralement, l'effet rebond est l'augmentation de consommation consécutive à la baisse de contraintes sur l'objet consommé.

Le sujet de l'effet rebond fait l'objet de recherches actives : à titre d'exemple un séminaire « économie et environnement » du CGDD/SEEIDD en date du 24 mars 2016 présente les résultats de l'institut Mines-télécom au regard de l'effet rebond lié aux

¹⁷² Voir expérimentation en liaison avec ENGIE: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Passeports-de-la-renovation.html>

¹⁷³ Les usagers connaissent le permis à points, mais aussi les dispositifs de fidélisation de la clientèle avec des points gagnés à chaque achat, et un retour de bonus in fine, en général sous forme de bon d'achats.

technologies de l'information, de l'école des ponts Paris Tech et du CIREN sur « les » effets rebond (prébond, rebond, etc.), du CSTB relativement à l'effet rebond dans le logement suite à l'enquête Phébus 2012 et aux travaux du CIREN et d'EDF.... Le sujet reste difficile, avec des effets très variables et diversement explicables.

Recherche sur les comportements

Enfin, l'ADEME est de plus en plus sensible aux enjeux humains, et multiplie les études, suivant un axe « sciences humaines et sociales¹⁷⁴ » (y compris en mobilisant le programme national des « investissements d'avenir »/PIA¹⁷⁵) : on peut en particulier citer ([voir ci-dessous 4.2.7](#)) la recherche-action de l'IFPEB sur les comportements vertueux dans un bâtiment tertiaire, où des économies de consommation énergétique d'au moins 25 % ont été constatées.

La recherche sur les comportements des propriétaires face à la rénovation énergétique (selon les lignes des efforts précitées de l'ADEME) mérite d'être renforcée, une autre recherche, d'ailleurs très active, se concentrant souvent sur les aspects techniques.

Le rapport CGEDD de 2013 émettait la recommandation suivante, : « Développer les recherches sur les comportements réels vis-à-vis des paramètres environnementaux ». Cette recommandation reste pertinente.

4.1.4.2. De premières mesures positives pour accompagner les différents acteurs finaux dans la rénovation

Les offres clé en main

Le rapport CGEDD de 2013 recommandait (recommandations 22, 23 et 24) de : « *confier aux grands opérateurs (notamment fournisseurs d'énergie) la mission de promouvoir des formules « clé en main » auprès de leurs clients, comportant étude technique et financière des travaux, offre de financement et remboursement intégré aux factures d'énergie* », et de « *donner aux opérateurs précités des obligations de résultat relatifs à cette procédure « clé en main » sur le mode des certificats d'économie d'énergie* »¹⁷⁶, et enfin de « *dimensionner ces obligations de résultat pour atteindre des objectifs fixés au niveau national en matière d'économies de GES (et non d'énergie)* ».

C'est en effet possible (les récentes initiatives d'EDF et ENGIE en matière d'autoconsommation vont en partie en ce sens¹⁷⁷), et les opérateurs fournisseurs d'énergie sont en effet en contact direct avec les clients / propriétaires. Ils peuvent fort bien connaître aussi la problématique des bâtiments ; leur intérêt à promouvoir un

¹⁷⁴ sur les 3 dernières éditions (2013, 2014 et 2015), les projets SHS représentent 10 projets sur 44 financés, pour un montant de 1.5 M€ d'aides, sur un total de 6.4 M€ (donc environ 1/4 des projets et des dépenses)

¹⁷⁵ Voir <http://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/innover-developper/programme-dinvestissements-davenir-pia>

¹⁷⁶ Les certificats d'économies d'énergie (CEE) reposent sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par les pouvoirs publics aux vendeurs d'énergie. Ceux-ci sont ainsi incités à promouvoir activement l'efficacité énergétique auprès de leurs clients: ménages, collectivités territoriales ou professionnels.

¹⁷⁷ offre de la filiale spécialisée d'EDF, en autoproduction / autoconsommation solaire : <https://www.edfenr.com/> et en particulier, <https://www.edfenr.com/actualites/groupe-edf-officialise-virage-vers-lautoconsommation/>. Mais aussi offre d'ENGIE, « my power » : <http://www.engie-travaux.fr/production-d-electricite/travaux/autoconsommation-my-power-engie>

vecteur énergétique qui n'est pas le leur, ou une moindre consommation (malgré les obligations liées aux CEE) peut par contre demander examen.

L'accompagnement des usagers et propriétaires

Le gouvernement, tenant compte des constats précédemment évoqués (cf ci-dessus 4.1.4.2), a donc pris diverses mesures pour mieux accompagner directement les propriétaires, définissant ou encadrant les éléments suivants :

- conseiller à la rénovation certifié (cf. LETCV art. 14) ;
- carnet numérique de suivi et d'entretien (art. 11) ;
- travaux en parties communes et obligation de compléter des travaux par un volet rénovation (art. 14¹⁷⁸) ;
- individualisation des frais de chauffage (art. 26 et 27¹⁷⁹) ;
- accès aux données de comptage (art. 28) ;
- etc.

Toutes ces mesures tendent à mieux informer, mieux accompagner, mieux responsabiliser le propriétaire. Une mesure essentielle réside aussi dans le cadre mis en place pour la création et la généralisation de plate-formes territoriales de la rénovation énergétique (cf. LETCV art. 22 et 188, et ci-dessous en [4.2.5](#)).

4.1.5. Vers une meilleure prise en compte de l'énergie grise

La prise en compte complète des cycles de vie du bâtiment (depuis la construction jusqu'à la démolition, en passant par le fonctionnement¹⁸⁰) a été amorcée par la LETCV, en ses articles 8-4° (analyse de cycle de vie) et ouvre la voie à une plus grande utilisation des matériaux biosourcés (article 14 VI) qui présentent des avantages en termes de séquestration de carbone et recyclage avant valorisation énergétique finale. Elle sera renforcée dans le cadre de la prochaine réglementation technique, qui émergera des expérimentations « BEPOS + carbone », annoncées le 1^{er} juillet 2016 ([voir 4.1.2 ci-dessus](#)).

4.2. Les voies de progrès à approfondir

4.2.1. Les écarts entre les économies d'énergie théoriques et réellement constatées

Le rapport CGEDD de 2013 abordait la question de la réalité des économies réellement obtenues après rénovation, et préconisait (recommandation 21) : « *Dans le domaine du bâtiment, poser clairement le plus tôt possible les problématiques d'écart entre les économies théoriques et les économies constatées de façon à engager la*

¹⁷⁸ Et décret n° 2016-711 du 30 mai 2016 relatif aux travaux d'isolation en cas de travaux de ravalement de façade, de réfection de toiture ou d'aménagement de locaux en vue de les rendre habitables

¹⁷⁹ Et décret n° 2016-710 du 30 mai 2016 relatif à la détermination individuelle de la quantité de chaleur consommée et à la répartition des frais de chauffage dans les immeubles collectifs

¹⁸⁰ Voir par exemple la norme EN 15978 de mesure de la soutenabilité environnementale des bâtiments, qui décompose le cycle de vie en 14 phases regroupées en quatre étapes (production A1-A3, construction A4-A5, utilisation B1-B7, fin de vie C1-C4, que l'on peut compléter par une phase finale sur les bénéfices et charges au delà du cycle de vie (réutilisation, recyclage, etc.), cf <http://etoolglobal.com/eblog/environnement/en-15978/>

recherche de solutions. Développer la recherche et les études permettant de comprendre les causes, pour s'efforcer d'y remédier ». Cette recommandation, au vu des considérations précédentes liée aux effets rebonds, reste pertinente.

Ce point est à bien prendre en compte, non seulement en termes de résultats des politiques publiques et objectifs nationaux, mais aussi lorsque la garantie de résultat participe du montage financier, soit en valorisation « verte » attendue du patrimoine, soit en conséquences concrètes sur la baisse de facture énergétique, permettant de rembourser les investissements. La crédibilité de la démarche de rénovation et sa popularisation en dépendent aussi.

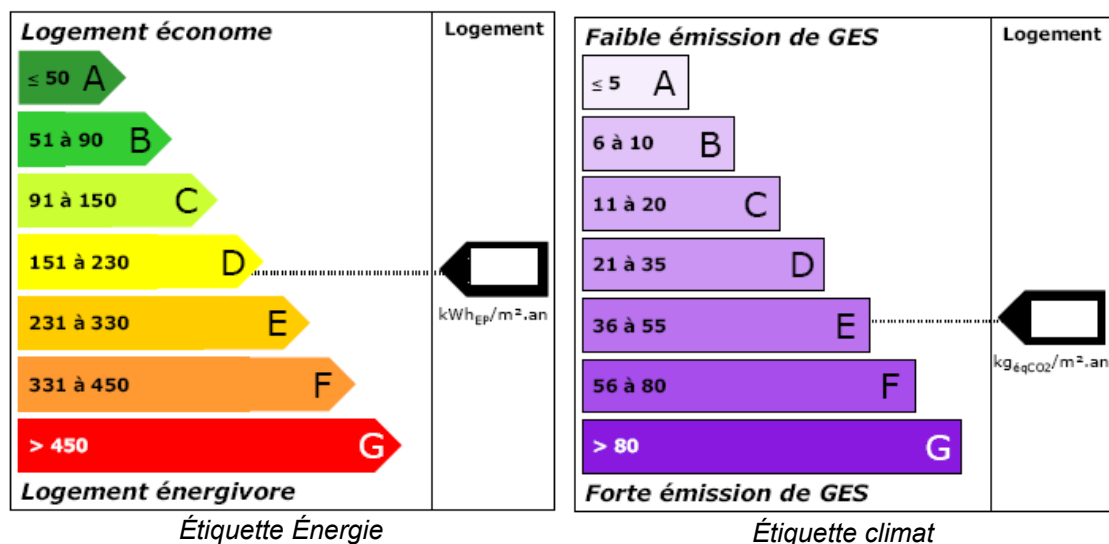
A ce stade, le DPE (diagnostic de performance énergétique) demandé avant tout déblocage d'une aide à la rénovation ne semble pas suffisant, d'autant qu'il n'est effectué qu'avant intervention et ne donne des éléments post travaux que de manière théorique.

Le diagnostic de performance énergétique (DPE) renseigne sur la performance énergétique d'un logement ou d'un bâtiment, en évaluant sa consommation d'énergie et son impact en termes d'émission de gaz à effet de serre. Il s'inscrit dans le cadre de la politique énergétique définie au niveau européen afin de réduire la consommation d'énergie des bâtiments et de limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Le contenu et les modalités d'établissement du DPE sont réglementés (les décrets et arrêtés sont téléchargeables sur le site : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Diagnostic-de-Performance,855-.html>). Le DPE décrit le bâtiment ou le logement (surface, orientation, murs, fenêtres, matériaux, etc), ainsi que ses équipements de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire, de refroidissement et de ventilation. Il indique, suivant les cas, **soit la quantité d'énergie effectivement consommée** (sur la base de **factures**), **soit la consommation d'énergie estimée** pour une **utilisation standardisée** du bâtiment ou du logement.

La lecture du DPE est facilitée par deux étiquettes à **7 classes de A à G** (A correspondant à la meilleure performance, G à la plus mauvaise) :

- **l'étiquette énergie** pour connaître la consommation d'énergie primaire ($\text{kWh}_{EP}/\text{m}^2.\text{an}$)
- **l'étiquette climat** pour connaître la quantité de GES émise ($\text{kg}_{eqCO2}/\text{m}^2.\text{an}$)



Bien entendu, les consommations réelles des bâtiments dépendent très directement des conditions d'usage et de la température effective de chauffage ; les consommations estimées ne sont donc pas une garantie contractuelle, mais elles permettent une comparaison objective de la qualité des logements et bâtiments mis en vente ou loués.

Les consommations en énergie primaire sont par ailleurs **complétées par les consommations en énergie finales**, avec une estimation des coûts annuels.

Le diagnostic comprend également **des recommandations** qui permettent à l'acquéreur, au propriétaire, au bailleur ou au locataire, de connaître les mesures les plus efficaces pour économiser de l'énergie : il s'agit de conseils de bon usage et de bonne gestion du bâtiment et de ses équipements, ainsi que de recommandations de travaux. Ces travaux conseillés ne sont pas obligatoires : le **DPE a pour objectif d'inciter à améliorer la performance énergétique** du bâtiment, pas d'obliger à la réalisation de travaux.

Le DPE stipule que les travaux sont à réaliser par un professionnel qualifié. Il donne également quelques indications pour s'informer plus avant :

- Consulter un point info-énergie dont la liste est donnée via le lien : http://www.ademe.fr/particuliers/PIE/liste_eie.asp
- Vérifier les possibilités d'obtention d'un crédit d'impôt pour réduire le prix d'achat des fournitures (cf. www.impots.gouv.fr)

Sauf cas particuliers, un DPE est **valable 10 ans**.

Le diagnostic de performance énergétique doit être **établi par un professionnel indépendant satisfaisant à des critères de compétence et ayant souscrit une assurance**.

Des organismes de certification de personnes, accrédités par le COFRAC (comité français d'accréditation), vérifient les compétences des candidats. **Cette certification est obligatoire** depuis le 1^{er} novembre 2007. Quelques 6 000 professionnels ont déjà été certifiés pour la réalisation du DPE. Les diagnostiqueurs peuvent se déclarer

auprès des intermédiaires immobiliers et des notaires qui pourront ainsi recourir à leurs services pour faire réaliser ces diagnostics.

*Ce dispositif s'inscrit dans un ensemble de mesures qui visent à la fois à limiter l'impact de la hausse des coûts de l'énergie sur le porte-monnaie des Français et aussi à préserver l'environnement. Cette étiquette énergie participe de l'**information des usagers**. Elle permet notamment à chaque ménage français qui achète ou loue un bien immobilier de mieux mesurer l'impact sur l'effet de serre de ses choix d'énergie et d'avoir une évaluation de sa facture énergétique.*

Comme vu plus haut, le flou de certaines définitions d'une rénovation n'aide pas à la clarification des résultats attendus: par exemple l'OPEN¹⁸¹ (observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement, piloté par l'ADEME) s'appuie sur une définition d'un geste performant, permettant de déterminer ce qu'est une rénovation énergétiquement performante (au sens de la LTECV qui a fixé à 500 000 le nombre de logements à rénover par an)¹⁸². L'OPEN compte les « logements ayant fait l'objet d'une rénovation énergétique performante et très performante ». Cette notion de « performance » n'est pas quantifiée en termes d'économie d'énergie, mais en termes de nombre de « gestes » effectués, avec au moins deux performants sur les cinq suivants : chauffage, ECS (eau chaude sanitaire), fenêtres, murs, toiture / combles. Un geste est "performant", quand il est « théoriquement compatible avec les niveaux requis pour les critères d'obtention des aides » à l'année considérée, ce qui est loin d'une garantie de résultat. D'autres définitions plus quantitatives (en extension, en coût, en amélioration) existent comme vu plus haut. Mais l'écart entre prévision et réalisé reste un problème, que la prévision quantitative soit inexistante ou différente (pour raisons diverses) des résultats constatés.

Les écarts entre économies attendues et constatées après travaux peuvent résulter d'une mauvaise connaissance du bâtiment à rénover, d'une mauvaise appréciation des travaux nécessaires, d'une mauvaise réalisation, mais aussi d'une mauvaise utilisation ultérieure : effet rebond précité, ou régulation inadéquate, ou conditions de fonctionnement différentes de celles ayant prévalu pour la conception, etc.

Il apparaît donc utile de travailler sur des modalités de garantie : avec le recours à des professionnels agréés (c'est l'approche RGE), formés spécifiquement ; le recours à des solutions de référence connues et éprouvées ; l'engagement des professionnels, sous une forme à déterminer, et contrôlable. Les bailleurs sociaux attendent très concrètement une garantie non seulement en termes d'énergie, mais aussi en termes d'amélioration du pouvoir d'achat de leurs locataires.

Un contrôle a posteriori est réalisable, par exemple par un contre-DPE après travaux, ou par usage d'une caméra thermographique avant et après travaux, ou en comparant les factures, ou en utilisant les données des compteurs intelligents en cours de déploiement. La conformité à la RT 2012 est vérifiée par le bureau de contrôle jusqu'à réception des travaux réalisés -et aussi en principe vérifiés- par le maître d'oeuvre. Il peut être utile d'associer le propriétaire (et le locataire) à l'accompagnement vers cette garantie : peut-être en jouant sur les reliquats d'aides ou les niveaux de remboursement, en les associant à des données fiables (comptages, etc.).

¹⁸¹ <http://www.ademe.fr/open-observatoire-permanent-lamelioration-energetique-logement-campagne-2015>

¹⁸² Voir http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

4.2.2. Une insuffisante organisation des filières professionnelles

4.2.2.1. Une multiplicité de corps de métier et une formation spécifique à renforcer

La force des professions du bâtiment réside dans la multiplicité des artisans et PME, largement implantés sur l'ensemble du territoire, mais cette multiplicité (voire cet éclatement) est aussi leur faiblesse, particulièrement handicapante en matière de rénovation énergétique.

Alors que les grands propriétaires, comme les opérateurs HLM ou les copropriétés, s'appuient sur des maîtres d'œuvre, et font appel souvent à des entreprises générales, le particulier se trouve confronté directement avec les divers corps de métiers. Et, suivant le corps de métier contacté, il peut se trouver avec des propositions de solutions diverses, très spécialisées et donc partielles : le plombier chauffagiste préconise une nouvelle chaudière, l'électricien, une pompe-à-chaleur air-air, le couvreur, une isolation du toit, le commercial des fenêtres, le changement des ouvrants et menuiseries, etc.). De plus les propositions peuvent ne pas avoir de vue d'ensemble des enjeux énergétiques (exemple : une étanchéité du toit sans isolation, ou des doubles vitrages sans isolation des murs). Ceci peut être aggravé par un déficit de formation en matière énergétique. Les formations préparant à la labellisation RGE n'ont que partiellement apporté une réponse. Cet émiettement n'est de plus pas favorable à l'émergence solutions intégrées sur la base de produits standardisés, industrialisés, garantis et à moindre coût.

Les divers dispositifs de formations continues existants dans les domaines de l'efficacité énergétique et des ENR (mis en place depuis le « Grenelle de l'environnement »):

- **PRAXIBAT**

Le programme PRAXIBAT est piloté par l'ADEME, il vise à développer, dans les territoires, des plateaux techniques de formations à la maîtrise du geste sur les thématiques de la ventilation, des parois opaques et de l'éclairage. Ces plateaux techniques sont mis en place en lien avec la région et le rectorat et situés (pour 90%) dans des lycées professionnels ou des CFA. Le financement de plateaux impose une mutualisation du plateau entre formation initiale et formation continue. En complément du plateau, l'ADEME a mis en place une formation de formateur, des formations pour artisans et a créé un réseau d'une trentaine d'expert nationaux chargés de réaliser les formations de formateurs et d'accompagner les structures souhaitant monter des plateaux.

<http://www.construction21.org/france/articles/fr/praxibat--le-geste-au-coeur-de-la-performance-energetique.html>

- **FEEBAT**

Le programme FEEBAT initié en 2007, vise à financer par les CEE la formation des artisans et maître d'œuvre du bâtiment à l'efficacité énergétique. Le programme définit aussi les CDC de formation et les critères de sélection des organismes de formation. Il a permis de former plus de 120 000 stagiaires depuis son démarrage.

<http://feebat.org/>

- **PACTE**

L'AXE 3 du programme PACTE consiste en un appel à projet à destination des territoires sur les questions de formation et montée en compétence des professionnels du bâtiment. Le financement cible l'ingénierie pédagogique, la construction de plateaux techniques, l'animation d'un réseau de formation.... une cinquantaine de projet ont été sélectionnés dans le cadre de ce programme.
<http://www.programmepacte.fr/programme>

- QUALIT'ENR

Le dispositif de formation initié par QUALIT'ENR depuis 2007 vise à améliorer l'offre de formation dans les énergies renouvelables. Pour cela, un dispositif qualité a été mis en place afin de définir les CDC des plateaux techniques de formation, la durée et le contenu des formations, les modes de sélection des formateurs.

- RGE

Le dispositif de qualification RGE fait le lien entre le l'offre et la demande du marché de la rénovation énergétique. Il définit un niveau de compétence minimum pour les entreprises qui est contrôlé par des organismes indépendant. Pour obtenir la mention, il faut notamment avoir suivi une formation de type QUALIT'ENR pour les qualifications dans le domaine des ENR ou de type FEEBAT pour les qualifications dans le domaine de l'efficacité énergétique.

- MOOC

en 2015, l'ADEME et le plan bâtiment ont lancé un groupe de travail sur les MOOC appliqués au domaine du bâtiment. Depuis, l'ADEME s'est inscrite au GIP FUN afin de bénéficier d'une plate-forme de MOOC qui rassemblera tous les MOOCS du bâtiment durable. Tous les projets de MOOCS retenus par PACTE seront hébergés sur cette plate-forme et co-financés par l'ADEME.
<http://mooc-batiment-durable.fr/>

- BUS

La première étape du projet européen Build Up Skills, a permis de faire un état des lieux quantitatif et qualitatif, partagé par toutes les parties prenantes, de la demande et de l'offre en matière de formation professionnelle. Une deuxième étape a consisté en la construction, avec les acteurs concernés, d'un plan d'action qui réponde aux nouveaux besoins et lève les freins ou inerties identifiés
<http://france.buildupskills.eu/fr/national-project>
<http://www.buildupskills.eu/national-projects>

Les formations continues décrites ci-dessus rencontrent diverses difficultés, comme :

- les articulations entre les divers programmes ;
- la qualité des formateurs, et des formations ;
- les liens avec les formations initiales, qui peuvent ne pas avoir intégré les évolutions récentes (RGE, matériaux biosourcés) ;
- l'accès des plateaux techniques des lycées professionnels pour les formations continues.

Des acteurs engagés dans l'animation de la rénovation énergétique prônent donc une indispensable évolution vers une organisation de la profession, un renforcement de la formation initiale, une amélioration de la formation continue, dans une optique de mise en place d'offres globales et garanties.

4.2.2.2. Une solution : les groupements d'entreprises

La Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB) joue un rôle dynamique en ce domaine, par exemple en promouvant les Groupements momentanés d'entreprises (GME¹⁸³).

Une réflexion nationale (à laquelle participait la CAPEB), menée dans le cadre du Plan Bâtiment Durable, a fait des propositions en juillet 2014, dans le cadre du rapport « rénovation énergétique et filière bâtiment¹⁸⁴ », dont :

- développer des méthodologies de mise en place de groupements ;
- renforcer la reconnaissance RGE pour les groupements permanents d'entreprises
- protéger juridiquement les groupements momentanés d'entreprises ;
- promouvoir et valoriser des offres globales par segment de marché.

Des plate-formes locales ont suscité la création de réseaux d'artisans et PME¹⁸⁵. Mais la préconisation plus générale porte sur la création de groupement, soit temporaires¹⁸⁶, soit permanents. Ceci suppose de dépasser les enjeux relationnels entre artisans, de prendre l'habitude de travailler ensemble, de bénéficier d'une assurance adaptée (en particulier pour couvrir la garantie décennale), de se former ensemble à l'objectif énergétique, de rechercher puis proposer des solutions standardisées et garanties.

4.2.2.3. Des initiatives notamment locales

On peut citer de nombreuses initiatives soit nationales, soit locales¹⁸⁷. Des plate-formes locales ont, par exemple, organisé des chantiers expérimentaux pour former ensemble des artisans¹⁸⁸. D'autres offrent la garantie décennale¹⁸⁹, ou ont travaillé avec des assureurs pour l'obtenir (mais avec des difficultés et parfois des échecs à mobiliser au

¹⁸³ Voir <http://www.capeb.fr/groupement-momentane-d-entreprises-gme/>

¹⁸⁴ Voir http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/140703_-_Rapport_REFB_Plan_Batiment_Durable_version_definitive-2.pdf

¹⁸⁵ cf. les RELAI (« REseaux Locaux d'Artisans Indépendants » du bâtiment), en Bretagne (Pays de Saint-Brieux), dans le cadre de « VIR'VOLT-ma maison », en liaison avec le « BATIPOLE », porté par la chambre des métiers et de l'artisanat des Côtes d'Armor : voir <http://www.batipole.org/particulier/>

¹⁸⁶ Comme les « groupements momentanés d'entreprises » (GME), expérimentés en Poitou-Charentes, par la plate-forme « ACT'E » (Pays des trois vallées) : <http://www.acte-renovation.fr/>

¹⁸⁷ Une exemple: la démarche de l'entreprise ENERTECH et l'institut NEGAWATT, pour former des artisans et les accompagner vers des groupements : DOREMI, « dispositif opérationnel de rénovation énergétique des maisons individuelles » (<http://www.institut-negawatt.com/page.php?id=10>) . Des collectivités ont mobilisé ce dispositif : en Drôme (« Biovallée ») ; en Alsace (« OKTAVE ») ; etc. (cf. « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016, déjà cité)

¹⁸⁸ cf. la démarche de la communauté de communes de la vallée de Kaysersberg en Alsace : <http://www.energivie.info/>

moins un assureur). D'autres mettent en place une maîtrise d'œuvre forte ou un suivi complet du chantier¹⁹⁰. D'autres enfin tendent de regrouper des chantiers sur un secteur, après un travail de typologie (par exemple via une thermographie aérienne, ou par camion), ciblage, afin de permettre aux groupements d'avoir plus de visibilité dans les plans de charge.

On peut citer aussi le mouvement naissant de coopératives artisanales, porté en particulier par l'Union Française des Coopératives Artisanales de Construction (UFCAC¹⁹¹).

4.2.2.4. Accompagnement, fédération, intégration, standardisation

Il peut être utile de constituer un cadre national d'accompagnement de ce nécessaire mouvement vers des groupements locaux d'artisans et PME¹⁹². Ces groupements devraient pouvoir aller jusqu'à inclure la maîtrise d'œuvre, et aussi inclure une compétence de conseil global en rénovation fondée sur une compétence technique avérée¹⁹³ (ingénieur thermicien, ...).

Ce cadre national, soutenant donc les initiatives locales, portées en particulier par les plate-formes locales de rénovation énergétique, devra être construit en partenariat avec tous les acteurs, à commencer par les instances professionnelles (fédération française du bâtiment, CAPEB, fédération des chambres des métiers, etc.), mais aussi d'autres partenaires, comme la fédération des assurances. Il pourrait créer un label spécifique, par exemple « RGE GROUPEMENT » ou soutenir l'émergence de solutions standardisées, de référence, adossées ou non à des offres industrialisées de niveau national. Il s'agit de ne pas s'en tenir à des solutions « isolation et maîtrise de l'énergie », mais d'aller vers une offre plus complète, qui peut éventuellement intégrer autoproduction/autoconsommation voire viser le niveau BEPOS dans certains cas favorables.

Aussi la multiplication récente d'offres dans le domaine de l'autoproduction / autoconsommation ne doit pas orienter vers des solutions trop individualisées, finalement coûteuses, et sans travail préalable sur le bâti aux fins de réduction des besoins énergétiques. En tout état de cause, le complément des « gestes » vertueux (au sens donc de l'OPEN de l'ADEME précité) serait utile pour avoir une vision plus globale, incluant éventuellement les approches BEPOS + carbone. Le choix est ouvert entre une réglementation imposant un objectif complet, et une incitation à atteindre à termes cet objectif plus ambitieux (avec par exemple l'outil d'incitation d'un carnet numérique à points). Actuellement, une réglementation trop ambitieuse pourrait se révéler contre-productive car décourageante, compte tenu des difficultés que rencontre la rénovation « seulement » BBC.

¹⁸⁹ cf. « Picardie Pass Rénovation », via le Service Public de l'Efficacité Énergétique, une régie montée par le Conseil régional : <http://www.pass-renovation.picardie.fr/>

¹⁹⁰ cf. le programme habitat Solidaire et Durable initié par le Conseil régional de Basse-Normandie (<https://www.normandie.fr/habitat-solidaire-et-durable>) : accompagnement des chantiers par un bureau d'étude, en faisant appel à des entreprises conventionnées « rénovateurs BBC ».

¹⁹¹ Voir <http://www.ufcac.com/>

¹⁹² À l'image de la création de coopératives après guerre dans le monde agricole, éminemment individualiste

¹⁹³ Promotelec a été à l'origine de la création d'une certification d'Expert en Rénovation Énergétique, comportant deux niveaux, correspondant aux méthodes de calcul réglementaires : 3CL (facile) et THCE-ex (plus difficile). Le niveau de la certification THCE-ex semblerait assez adapté au sujet, et pourrait être une bonne base pour le conseiller rénovation certifié cité à l'article 14 de la LTECV

Le contexte local peut permettre d'adapter, voire d'offrir des dispositifs plus aboutis, avec des labellisations locales. Ceci peut d'autant plus être pertinent qu'émergent des approches par groupes d'immeubles ou quartiers qui permettent des effets d'échelles, et des recherches plus adaptées de solutions locales de production énergétique.

L'adossement des groupements locaux à une offre industrialisée, voire standardisée, suppose qu'elle ait pu émerger. L'imitation de la démarche du gouvernement néerlandais (ENERGIESPRONG¹⁹⁴ : avec un objectif de 100 000 maisons individuelles sociales rénovées énergétiquement, en « zéro énergie »), tendrait à préconiser de mobiliser en priorité le mouvement HLM ou les OPAH, plus à même de passer des commandes lourdes, et donc de permettre l'émergence d'un marché suffisant pour susciter une offre industrialisée. Certes, la rénovation des maisons individuelles reste bien la priorité énergétique (et en termes de limitation des gaz à effet de serre), mais la complexité de l'atomisation des acteurs (demande et offre) gêne la montée en puissance. Le complément par un effort via le secteur HLM peut aider à accélérer demain le marché de la rénovation individuelle.

Le bâti français reste hétérogène et de telles approches plus systématisées supposent des adaptations locales. Il est vraisemblable qu'il faille distinguer nettement le secteur individuel et le secteur collectif. Les approches existent déjà en partie pour certains « gestes » : on peut citer la filière industrielle des fenêtres PVC, ou celle des extensions en structures aluminium, ou (c'est encore émergent) en bois¹⁹⁵.

4.2.3. Des efforts à faire, à terme, pour maîtriser la part relative croissante d'énergie consommée par les équipements

L'énergie consommée par les équipements (électriques, électroniques, bureautiques) est l'un des quatre enjeux techniques évoqués dans une section précédente de la présente annexe.

Même si, actuellement, la part d'énergie consommée dans un bâtiment par les divers équipements est faible ([voir tableau ADEME ci-dessous en 5](#)), elle devient significative dans un bâtiment BBC / RT 2012, et encore plus dans un bâtiment BEPOS, en particulier dans le tertiaire, notamment du fait de l'importance de l'informatique, de la bureautique, de l'équipement électronique et des data centers ([voir ci-dessus 3.1.1.2 et 3.1.1.3](#)).

L'effort d'étiquetage énergétique des équipements doit se poursuivre, mais en parallèle, le bâtiment rénové doit être pris en main. L'individualisation des données de consommation (par exemple au moyen de compteurs intelligents), en temps réel, peut aider l'utilisateur à mieux gérer son parc d'équipements consommateurs d'énergie. Des plate-formes locales s'investissent dans cet après travaux d'accompagnement.

Dans le tertiaire, les rénovations lourdes, qui permettent des gains significatifs par changement et modernisation du chauffage, par isolation, par régulation, doivent éviter

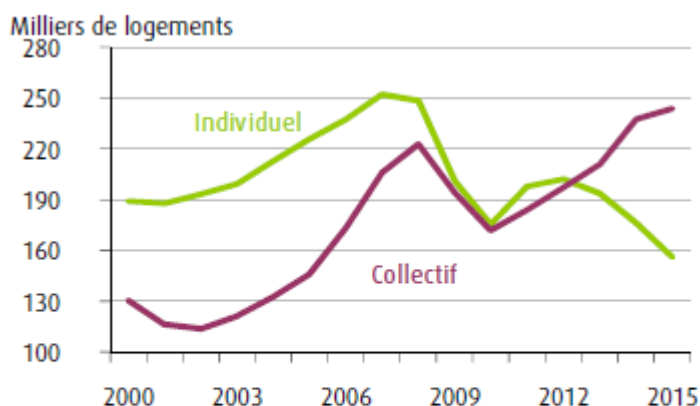
¹⁹⁴ Voir : <http://www.energiesprong.nl/> ou <http://www.energiesprong.eu/>, mais aussi l'engagement d'un bailleur social français suivant ce modèle : <http://blog.vilogia.fr/energiesprong/>. Actuellement l'USH accompagne sept organismes d'HLM qui souhaitent mener dès 2017 des opérations dans cet esprit, y compris sur des collectifs. L'idée est de transposer le processus : l'intérêt de ce projet Energiesprong se trouve dans deux entrées : passer le pas de la massification ; avoir une garantie de résultat in fine

¹⁹⁵ Sur le bois l'USH a publié en mars 2015 une « évaluation d'opérations de construction de logements sociaux collectifs bois ». Cette étude sur 9 opérations, sans vocation statistique, indique des coûts équivalents pour les filières béton, mixte bois-béton et tout bois, (1320 €/m² SHAB) mais plus élevés (peut-être en raison pour la filière modulaire 3D bois (2360 €/m² SHAB) qui par contre raccourcit les délais de chantier de 6 mois par rapport au béton. (3 mois pour le tout bois)

les pertes par ailleurs toujours possibles, par exemple du fait du renforcement de l'éclairage, ou de la modernisation des équipements informatiques et audio-visuels. Il convient donc de veiller à économiser ou récupérer l'énergie des équipements, notamment informatiques. Des intervenants spécialisés considèrent que l'on peut d'ores et déjà gagner aisément 30 % de la consommation énergétique d'un bureau, d'un lieu industriel, etc. D'autres travaillent à la récupération ou vente d'énergie générée par les data centers. D'autres approfondissent les capacités de stockage d'énergie, par exemple via le froid. Ce champ de recherches et d'études mérite d'être exploré, et les résultats largement diffusés.

4.2.4. Des pistes pour renforcer la part des logements en collectifs

Les logements collectifs sont moins consommateurs d'espace, réduisent les déperditions globales, permettent des effets d'échelles notamment en termes de réseaux (VRD, etc.), ou des transports, et donc, génèrent moins de dépenses énergétiques globales (énergie grise) et d'émissions de gaz à effet de serre. Accroître la part des collectifs dans les constructions neuves est donc un enjeu, même si les pratiques sont assez variables suivant les régions. La tendance actuelle, croissante, est favorable. Elle résulte de l'effort d'investissement des bailleurs sociaux ces dernières années et des baisses des délais de construction.¹⁹⁶



Champ : logements terminés en France métropolitaine - Le collectif intègre les résidences.

Source : CSL2014 d'après SOeS-Sit@del2 base au 30/10/15

Logements terminés selon le type – données annuelles - Source : « Comptes du logement 2014 – premiers résultats 2015 », p. 16, CGDD, février 2016, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Referenc es/2016/compte-logement-2014-references-fevrier-2016.pdf

Par contre la loi SRU n'a pas à ce jour donné tous les effets escomptés, car nombre de communes continuent à privilégier les extensions urbaines, à faible densité. La récente obligation de passer en PLUi (PLU intercommunal, sous pilotage des EPCI qui doivent être mis en place avant 2017) pourrait aider à infléchir la tendance. Les lois

¹⁹⁶ Source : Source : « Comptes du logement 2014 – premiers résultats 2015 », CGDD, février 2016, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/References/2016/compte-logement-2014-references-fevrier-2016.pdf

« ALUR¹⁹⁷ » (loi pour l'Accès au Logement et un Urbanisme Rénové) puis LTECV ont introduit des mesures en faveur de la densification (comme la suppression du coefficient maximal d'occupation des sols, ex « COS »), dans le cadre de constructions respectant des objectifs énergétiques, en permettant des dérogations de hauteur (cf. LTECV, article 8 – 3°) ou des « bonus de constructibilité », récemment entériné par décret du 28 juin 2016¹⁹⁸. On peut aussi envisager de donner des objectifs plus précis dans les PLH, afin de favoriser les immeubles collectifs.

En tout état de cause, il apparaît donc utile de reprendre les réflexions nationales, voire d'inciter plus au niveau local, pour plus nettement favoriser les constructions neuves d'immeubles collectifs.

Par ailleurs, les coûts au mètre carré des rénovations énergétiques peuvent être bien moins élevés dans les immeubles collectifs que dans l'habitat individuel : c'est très net en isolation extérieure, mais aussi sous toiture. L'énergie consommée en chauffage est en général très carbonée au départ (fioul, parfois gaz), et les gains potentiels en décarbonation peuvent être importants, par exemple par raccordement à un chauffage urbain lui-même décarboné (biomasse, etc.). Enfin, les chantiers menés en collectifs nécessitent des approches très professionnelles, avec des maîtres d'œuvre et des entreprises d'une certaine taille, ce qui garantit, en général, une bonne exécution. Sans remettre donc en cause la cible prioritaire des maisons individuelles, un effort plus marqué sur les immeubles collectifs pourrait permettre d'avancer plus rapidement, et, de plus, de faire émerger un marché plus industrialisé, utile pour caler des techniques et méthodes, utilisables ensuite sur le marché des individuels. Le renforcement de la part du collectif dans la construction neuve a aussi des impacts en termes de maîtrise de l'étalement urbain, des distances de transports, aussi l'on se place du point de vue du territoire.¹⁹⁹

4.2.5. Développer et soutenir l'usage des matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés sont l'un des enjeux techniques évoqués dans une section précédente, consacrée au carbone gris, de la présente annexe.

Un rapport CGAAER/CGE/CGEDD de 2015 « Faciliter l'accès au marché pour les produits, équipements et procédés innovants dans le domaine de la construction »²⁰⁰ a spécifiquement approfondi la thématique de la diffusion des matériaux biosourcés dans le bâtiment, *« car ces derniers participent à la diminution de l'empreinte environnementale des bâtiments en raison de :*

- *leur caractère renouvelable à l'échelle de la durée de vie d'un bâtiment contrairement aux matériaux minéraux ou d'origine pétrolière ;*
- *leur capacité à stocker le CO2 par photosynthèse ;*

¹⁹⁷ Voir : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000028772256&categorieLien=id>

¹⁹⁸ Complétant les avancées de la loi « ALUR » supprimant les coefficients d'occupation des sols (COS).

¹⁹⁹ Dans l'exercice « Scénarios Prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 », la limitation de l'étalement urbain par l'augmentation de la proportion de logements sociaux, et des investissements accrus en transports collectifs sont envisagés par son scénario AMS2 (« avec mesures supplémentaires 2 »); ce scénario est le scénario de référence de la SNBC, à une vocation nationale, et prend en compte les mesures adoptées ou annoncées après le 1^{er} janvier 2014, à la différence du scénario AME « avec mesures existantes », qui lui est transmis à la commission européenne; voir http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

²⁰⁰ Rapport CGEDD 009841-01 de décembre 2015, voir : http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/009841-01_rapport_cle29f4ab.pdf

- *le faible besoin en énergie pour leur transformation avant mise en œuvre. »*

Le rapport conclut en faisant quatre recommandations :

- une mesure de communication : *« Demander à la DGPE et la DHUP de mettre en place une communication dynamique montrant les qualités spécifiques d'une construction à base de produits bio sourcés. »*
- trois mesures en faveur du bois construction : *«*
 - *Demander à la DHUP et à la DGPE d'élaborer, en lien avec les organisations professionnelles, un projet financé au travers des investissements d'avenir pour faire significativement progresser la caractérisation fonctionnelle des bois feuillus (chêne et hêtre) qui constituent une part prépondérante des ressources forestières françaises ;*
 - *Demander à la CCFAT²⁰¹ de vérifier que la procédure d'avis technique n'impose pas des exigences exagérées pour des techniques éprouvées à l'étranger, notamment pour les produits mettant en œuvre du bois, le cas échéant, alléger les essais dans le cadre des avis techniques pour tenir compte des expériences existantes ou des produits ou systèmes antérieurs ;*
 - *Demander à la DHUP d'organiser une enquête sous l'égide des fédérations professionnelles pour identifier les points des DTU qui ne prennent pas en considération le matériau bois et demander au BNBA de rédiger l'ensemble des amendements utiles. »*

Ce rapport évoque d'une manière plus générale les difficultés de généralisation des innovations et préconise des évolutions dans divers domaines dont : la sensibilisation et l'acculturation des acteurs du bâtiment ; formation des architectes et professionnels du bâtiment ; enjeu d'une approche par coût global ; mobilisation des souplesses offertes par le code des marchés publics ; nécessaires alliances entre PME et TPE du secteur du bâtiment ; etc.

Au sein de la formation RGE (trois jours), le temps consacré aux matériaux biosourcés ne dépasse en général pas 10 à 15 minutes.

L'initiative d'une toute jeune société coopérative, KARIBATI²⁰², qui s'est lancé dans la diffusion d'informations sur les matériaux biosourcés, avec l'appui de l'administration (DGALN/DHUP), reste anecdotique.

De plus, le domaine du bois-construction, malgré de nombreuses initiatives (allant jusqu'à permettre la construction d'immeubles de hauteur en ossature bois), reste trop dépendant de bois nordiques ou d'Autriche, de machines-outils allemandes, etc.

Les matériaux biosourcés doivent respecter aussi les enjeux environnementaux (forêts gérées durablement, cultures sans concurrence avec les cultures alimentaires, non utilisation d'intrants d'origine pétrolière et polluant, maîtrise des traitements chimiques de conservation, etc.), ainsi que les impératifs de maîtrise de la consommation d'énergie à la production, par exemple au séchage.

²⁰¹ CCFAT : commission chargée de formuler les avis techniques : <http://www.ccfat.fr/>

²⁰² Voir <http://www.karibati.fr/>

Les évolutions des futures réglementations tant dans la construction neuve (de la RT 2012 à la RE 2018) que dans la rénovation (évolution des RT 2007 et 2008²⁰³) tendant à intégrer la prise en compte du carbone et de maîtrise des gaz à effet de serre, devraient permettre et encourager l'utilisation des matériaux biosourcés, avec des actions d'accompagnement (normalisation, formation, organisation des filières, etc.).

Il convient de promouvoir, en parallèle d'une filière bois nationale, le développement des usages de ces matériaux biosourcés, dès lors que leur qualité en termes de séquestration du carbone est établie, notamment du point de vue d'une analyse de cycle de vie qui montre qu'ils doivent être stockés sous forme matériaux pendant un temps dit de « retour carbone » avant recyclage, et, en fin de vie, valorisation énergétique.²⁰⁴ Une telle analyse de cycle de vie doit permettre de vérifier la faible émission de carbone lors de la production et fabrication (séchage par exemple), ainsi que lors du transport (éviter d'importer des bois du Brésil, par exemple). Or de telles analyses de cycle de vie restent à stabiliser et normaliser²⁰⁵.

La recommandation 18 du rapport CGEDD de 2013 reste donc valable. Elle est d'ailleurs confirmée par le rapport d'avril 2016 de l'Académie des technologies sur les technologies et le changement climatique²⁰⁶, qui recommande de « relancer la filière de construction fondée sur le bois ». Elle peut être étendue à l'ensemble des matériaux biosourcés, et par exemple ainsi reformulée :

« Envisager le bois stocké (par exemple dans la construction), ainsi que l'ensemble des matériaux biosourcés, comme un moyen compétitif de séquestration du carbone et mettre en œuvre un programme cohérent de mobilisation et de valorisation, notamment, de la ressource forestière. »

4.2.6. Étendre la mobilisation à l'échelle du quartier et du territoire

Dans un contexte de développement des énergies renouvelables, la décentralisation de la production va s'accélérer. Le développement actuel de l'autoproduction et de l'autoconsommation, mentionné plus haut, en est un signe. Certains grands acteurs énergétiques ont déjà amorcé le virage²⁰⁷. Par ailleurs, la mobilisation des propriétaires pour une rénovation ambitieuse sera d'autant plus efficace que des acteurs locaux,

²⁰³ <http://www.planbatimentdurable.fr/comprendre-la-rt-existant-r175.html> . La RT 2008 s'applique pour les rénovations lourdes et les grandes surfaces, avec application de la méthode « RT globale » pour les bâtiments antérieurs à 1948 et de la méthode RT « éléments par éléments » pour ceux postérieurs à 1948. La RT 2007 recouvre aussi le reste, couvert par la méthode RT « éléments par éléments » . La RT « éléments par élément » est à la date de rédaction (octobre 2016) en cours d'examen pour un possible rehaussement des seuils.

²⁰⁴ Cf. « Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique aux horizons 2020, 2030, 2050 », synthèse, <http://agriculture.gouv.fr/telecharger/81463?token=2a4e0b2367642981a872805cf81ba4f2> et aussi Source, ADEME 2015, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis_ademe_foret-attenuation-cght-clim_vdef.pdf

²⁰⁵ le stockage du carbone par le bois mérite, par exemple, attention : en fin de vie, attention au relargage du carbone du bois, quand il pourrit ou quand il est brûlé. Le stockage du carbone par le bois reste provisoire. Attention aussi sur l'accroissement des prélèvements sur la forêt : au départ le bilan est négatif pendant un certain temps ! Reste à bien étudier les usages ensuite du bois récolté, avec des scénarios assez variés, sur des périodes pouvant être très longues (jusqu'à 50 ans). Autre réflexion à mener : que se passe-t-il sur le carbone dans les sols, après récolte du bois. En clair, c'est complexe, même s'il y a un stockage au moins pendant la vie d'une construction bois.

²⁰⁶ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2016/04/21/12/45/33/406/Rapport_TCC_DEF.pdf

²⁰⁷ Comme ENGIE ou E-ON. Voir par exemple la préface par G. Mestrallet de l'ouvrage « l'énergie en état de choc » (Eyrolles, septembre 2015)

notamment public, joueront un rôle d'incitation et d'animation. L'objectif « énergie - carbone » lancé par le gouvernement le 1^{er} juillet 2016 pour le bâtiment neuf, repose sur les deux orientations du bâtiment à énergie positive et du bâtiment bas carbone. Il peut dans certains cas renforcer le lien entre rénovation et production locale d'énergie. Enfin, la prise en compte du confort d'été amène comme vu plus haut à des réflexions sur des territoires « passifs ». La rénovation énergétique peut donc se penser au-delà du bâtiment, à l'échelle des quartiers et des territoires.

Une approche plus globale semble donc utile. Il d'ailleurs est significatif, à ce titre, que l'Académie des technologies, dans ses avis²⁰⁸ et rapport²⁰⁹ du 2015 et 2016 sur « les technologies et le changement climatique », ait même choisi de regrouper, dans son analyse, les sujets suivants : bâtiment, urbanisme, mobilité et transport.

4.2.6.1. Exemple allemand

L'Allemagne s'est ainsi engagée dans des démarches à l'échelle de quartiers : c'est le programme de rénovation urbaine (Stadtssanierung), qui tend à mener la rénovation à l'échelle d'un quartier.

²¹⁰ *Le programme allemand Stadtssanierung a été lancé en novembre 2011 et est également confié à la banque KfW. Il intègre une dimension sociale propre à la politique de la ville (prévoyant la participation des résidents par exemple).*

*Son premier volet se situe en amont de la phase de réalisation des travaux puisqu'il prévoit des subventions pour la mise en place d'un **concept de rénovation à l'échelle d'un ensemble d'habitations**. Il rassemble différents acteurs locaux: collectivités locales, associations de propriétaires, bureaux d'architectes, résidents... Il peut être porté par une collectivité locale ou par une association de résidents. Il vise à **identifier une solution d'ensemble pour penser une rénovation propre à plusieurs bâtiments (par exemple, modernisation de la source d'approvisionnement en énergie par l'instauration d'une installation biomasse à l'échelle d'un quartier)**. Un « manager de ville » est nommé pour mener cette réflexion à l'échelle d'un ensemble d'habitation et instaurer un dialogue entre les différents acteurs impliqués.*

Les subventions accordées sont à hauteur de 65% des coûts. L'activité du « manager de ville » peut être financée à hauteur de 150 000 euros pour une durée totale de trois ans.

Avec son second volet, les collectivités locales peuvent bénéficier également de prêts à taux bonifiés pour l'amélioration durable de leurs systèmes d'approvisionnement énergétiques.

Le budget du programme s'élève au total à 50 millions d'euros par an (2012-2015).

²⁰⁸ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2015/12/02/14/44/13/795/Avis_TechnologiesClimat_20151110.pdf

²⁰⁹ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2016/04/21/12/45/33/406/Rapport_TCC_DEF.pdf

²¹⁰ Encart extrait du rapport (déjà cité) de la Direction générale du Trésor de 2013 « les politiques mises en place pour améliorer la performance énergétique des bâtiments (logements privés, sociaux, bâtiments tertiaires) – analyse comparative dans huit pays », http://intra.daei.sg.i2/IMG/pdf/Rapport_ECI_performance_energetique_des_batiments_cle012c8c.pdf

4.2.6.2. Écoquartiers et TEPCV

En France, de telles démarches existent. Par exemple le label ÉcoQuartier a depuis 2013 récompensé 39 collectivités dont certaines ont procédé à des rénovations thermiques très significatives (isolation renforcée, recours aux énergies renouvelables, réseau de chaleur au bois pour l'écoquartier de Villedieu-le-Puits ; écoquartier Molière alimenté par chaufferie au bois autour du pôle éducatif éponyme, bâtiment HQE ; écoquartier Parc Marianne hébergeant deux groupes scolaires BEPOS...)²¹¹.

Plus récemment le gouvernement a lancé des appels à initiatives proposées par les territoires : les TEPOS (territoires à énergie positive²¹²), puis les TEPCV (territoires à énergie positive pour la croissance verte²¹³). L'annonce de l'initiative a eu lieu le 4 septembre 2014, avec une double logique de mise en réseau et d'expérimentation, mais aussi de financement d'opérations concrètes²¹⁴. 212 collectivités ont été lauréates en février 2015. On a pu voir émerger des initiatives régionales, départementales ou communales.

En 2016 plus 400 TEPCV maillent le territoire. Le dispositif bénéficie d'un fonds de 750 M€ sur trois ans. Les thèmes des TEPCV sont l'efficacité énergétique, la mobilité douce, les énergies renouvelables, la biodiversité, la prévention des déchets, l'éducation. L'essentiel des soutiens porte sur la rénovation énergétique, la mobilité électrique et les éclairages publics. Les opérations particulières peuvent inclure des opérations de rénovations, de mise en réseau intelligent, d'économie sur l'éclairage public, de formation, etc.²¹⁵

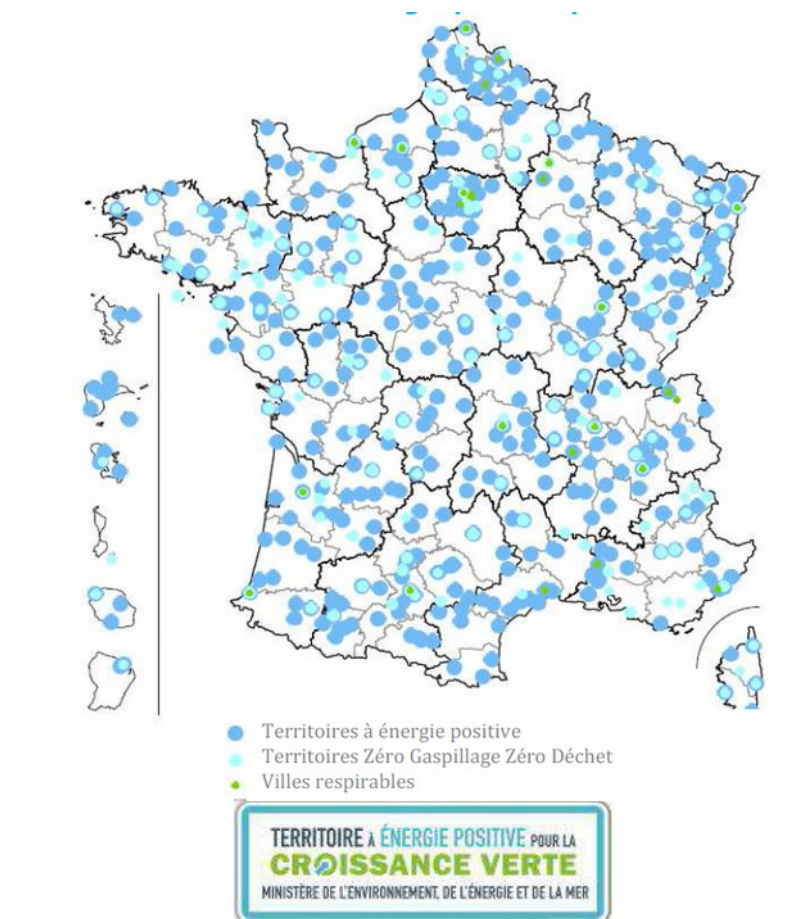
²¹¹ http://www.logement.gouv.fr/IMG/pdf/eco-quartiers_brochure_web.pdf

²¹² Concept de labellisation initialement lancé en 2010 par le CLER (comité de liaison énergie renouvelable) – réseau pour la transition énergétique <http://www.cler.org/>

²¹³ Voir : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Territoires-a-energie-positive-.html>

²¹⁴ Source : Synthèse des travaux conduits en 2015 au sein de l'Atelier Énergie et Territoires, http://www.edfville durable.fr/atelierenergieetterritoires/wp-content/uploads/2016/06/AET_Rapport_TEPCV-V1.pdf

²¹⁵ Exemples disponibles sur <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Brochures-territoires-a-energie.html>



Source : La loi de transition énergétique pour la croissance verte : un an après - 22 Juillet 2016, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2016-07-22_DP_loi_TE_1an-2.pdf

Les travaux et engagements passés des territoires peuvent favoriser l'émergence de telles initiatives : SCOT (schéma de cohérence territoriale), agenda 21, plan climat-énergie, PLH (programme local de l'habitat), OPAH (opération programmée d'amélioration de l'habitat), etc.

Mais, au-delà de l'animation de rénovations énergétiques (telles que mises en valeur par l'ADEME présentant les initiatives de territoires pour la rénovation énergétique de l'habitat²¹⁶), l'enjeu réside dans des actions très locales, sur un quartier, un lotissement, un groupe d'immeubles, c'est-à-dire à une échelle qui va permettre l'optimisation des chantiers de rénovation énergétique, mais aussi la recherche de solution de production et stockage locaux de l'énergie, associées à une gestion fine de ces réseaux locaux.

Ce peut être un des objectifs à donner aux PTRE, plate-formes territoriales de la rénovation énergétique (cf. LTECV art. 22 et 188). Il s'agirait d'allier rénovation et production locale de l'énergie afin d'étendre cet objectif, désormais affiché pour les constructions neuves, (cf. annonces gouvernementales du 1^{er} juillet 2016), vers la rénovation prenant en compte les deux aspects : « énergie – carbone ».

Au vu des difficultés rencontrées actuellement en rénovation thermique du bâtiment, un tel objectif apparaît cependant très ambitieux.

²¹⁶ cf. « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016, déjà cité

4.2.6.3. Les PTRE

L'article 22 de la LTECV promeut l'idée d'un « service public de la performance énergétique de l'habitat » appuyé « sur un réseau de plate-formes territoriales de la rénovation énergétique » (PTRE) ayant « une mission d'accueil, d'information et de conseil du consommateur » et pouvant « être notamment gérées par les collectivités territoriales ou leurs groupements, les services territoriaux de l'État, les agences départementales d'information sur le logement, les agences locales de l'énergie et du climat, les conseils d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement, les espaces info énergie ou les associations locales ».

« Les plate-formes de rénovation énergétique constituent un service public de la performance énergétique de l'habitat.

Elles assurent l'accompagnement des particuliers qui souhaitent diminuer la consommation énergétique de leur logement et complètent le dispositif des Points rénovation info service (PRIS).

Une plate-forme de rénovation énergétique a pour objectifs de :

- mobiliser les structures et les acteurs publics et privés pour atteindre les objectifs de rénovation énergétique des logements du territoire en cohérence avec les objectifs nationaux ;*
- stimuler la demande en travaux de rénovation des particuliers et faciliter leur passage à l'acte ;*
- contribuer à la structuration de l'offre des professionnels du bâtiment et à leur qualification dans le cadre du déploiement du signe RGE (reconnu garant de l'environnement) ;*
- engager le secteur bancaire et mobiliser les financements publics et les mécanismes de marché (CEE, etc.) pour proposer une offre de financement adéquate. »²¹⁷*

Une organisation concrète et pérenne, reste à bâtir : un réseau de plate-formes territoriales, s'il ne dépend que des bonnes volontés locales ne saurait répondre à cette ambition affichée d'un « service public » (en tant que dispositif garanti au niveau national pour tous les habitants). Une piste est la généralisation d'autorités organisatrices de la rénovation énergétique (à l'instar des autorités organisatrices des transports urbains / AOTU), en s'appuyant éventuellement sur les « autorités organisatrices d'un réseau public de distribution d'électricité » (voir alinéa X-3° de l'article 188 de la LTECV).

En l'attente, les nombreuses initiatives déjà lancées laissent apparaître deux niveaux d'intervention, en s'appuyant sur le cadre national :

- le niveau local, intercommunal, très opérationnel, de mobilisation des professionnels (création de groupements, formations, etc.) et d'accompagnement des propriétaires, avec des recherches de systématisation des interventions au regard des réalités locales (climatiques, institutionnelles, etc.) ;
- le niveau régional de cadrage et soutien, en liaison avec les acteurs professionnels (du bâtiment, du secteur financier, etc.), avec mise en place d'institutions (de formation, etc.) ou d'outils (notamment financiers).

²¹⁷ <http://www.ademe.fr/collectivites-secteur-public/integrer-lenvironnement-domaines-dintervention/renovation-lhabitat/dossier/organiser-plateforme-renovation-energetique/quest-quune-plateforme-renovation-energetique>

Ceci n'exclue d'ailleurs pas la possibilité d'une forte intégration régionale et locale (comme en Seine-Saint-Denis ou en Basse-Normandie).

Des objectifs plus forts pourraient être donnés à ces PTRE, en affichant l'objectif 2050, requérant donc une mise en perspective, une trajectoire pour l'atteindre, via une stratégie et un plan d'actions pluriannuel. La prise en compte d'une approche de production d'énergie locale va aussi amener à s'interroger sur leur rôle en termes de production locale, stockage et consommation locale d'énergie.

4.2.7. L'exemplarité des institutions publiques, à commencer par l'État, reste à démontrer

4.2.7.1. Les insuffisances constatées par le rapport de 2013 restent encore valides

Les constats du rapport CGEDD de 2013 sont pessimistes : « L'objectif « État exemplaire », spécifique au parc immobilier de l'État, a pu bénéficier d'une excellente impulsion de départ avec la mise en place, au titre du plan de relance de la fin 2008, d'un crédit de 50 M€ destiné aux audits. Le lancement simultané de la « nouvelle politique immobilière de l'État » intégrait en principe les objectifs « Grenelle », mais le dispositif mis en place pour financer l'entretien et l'amélioration du parc, démarqué de la gestion immobilière classique, n'a pas été calibré pour faire face aux dépenses de rénovation thermique, ni d'ailleurs aux dépenses de mise en accessibilité. Les documents budgétaires continuent d'affirmer sereinement que les dotations budgétaires du programme LOLF²¹⁸ 309 « Entretien du patrimoine immobilier de l'État », géré par France-Domaine, qui se montent à 200 M€/an environ pour l'ensemble des dépenses, vont permettre d'engager le programme de rénovation énergétique, pourtant estimé par le comité « Grenelle » n° 4 à 1 Md €/an pendant dix ans. Il est, dans ces conditions, bien douteux que des travaux significatifs puissent être engagés. Les ministères disposent pourtant encore de crédits budgétaires consacrés à l'immobilier, puisqu'ils lancent parfois d'ambitieux programmes de travaux neufs. Il est vrai que les ministères ne sont plus affectataires de leurs immeubles, mais simples occupants. Ils estiment alors que le gros entretien incombe au propriétaire, représenté par France-Domaine. »

Ces constats restent d'actualité même si le tableau de bord 2014 du Plan bâtiment durable²¹⁹ constate une baisse de dépenses énergétiques par agent entre 2009 et 2011. Sur un échantillon, « La consommation énergétique du parc tertiaire audité s'élève à 245 kWhEP/m²shon.an (étiquette énergie D) et les émissions de gaz à effet de serre s'élèvent à 30,5 kgCO₂/m²shon.an (étiquette climat D) ». Comme on le voit ci-après, un travail de caractérisation du parc a été entamé par France Domaine, devenu en 2016 la direction de l'immobilière de l'État, rattachée à la DGFIP. Mais l'objectif du Grenelle apparaît peu atteignable.

²¹⁸ Loi organique relative aux lois de finance.

²¹⁹ http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/CSTB_TABLEAU_DE_BORD_2014.pdf

4.2.7.2. Des engagements initiaux ambitieux

Pourtant, la France est désormais engagée à respecter la directive européenne 2012/27/UE sur l'efficacité énergétique²²⁰, qui fixe un objectif de 3 % de rénovation annuelle des bâtiments de l'État ou des économies d'énergies équivalentes²²¹.

Déjà, l'article 5 de Loi « Grenelle » du 3 août 2009 précisait la contribution que devait apporter l'État: « *Tous les bâtiments de l'État et de ses établissements publics seront soumis à un audit d'ici à 2010. L'objectif est, à partir du diagnostic ainsi établi, d'engager leur rénovation d'ici à 2012 avec traitement de leurs surfaces les moins économes en énergie. Cette rénovation aura pour objectif de réduire d'au moins 40 % les consommations d'énergie et d'au moins 50 % les émissions de gaz à effet de serre de ces bâtiments dans un délai de huit ans.* » Et l'article 48 précise : « *les administrations de l'État entreprendront au plus tard en 2009 un bilan de leurs consommations d'énergie et de leurs émissions de gaz à effet de serre et engageront un plan pour améliorer leur efficacité énergétique, qui prendra en compte les objectifs fixés pour les bâtiments de l'État par le I de l'article 5, avec un objectif d'amélioration de 20 % en 2015* ». Enfin, l'article 4 dispose que l'État se fixe comme objectifs que « *toutes les constructions neuves faisant l'objet d'une demande de permis de construire déposée [...] à compter de la fin 2010, s'il s'agit de bâtiments publics et de bâtiments affectés au secteur tertiaire, présentent une consommation d'énergie primaire inférieure à un seuil de 50 kilowattheures par mètre carré et par an en moyenne* ».

Ce chantier de rénovation a pris du retard et est loin d'être achevé, pour des raisons diverses explicitées ci-après.

4.2.7.3. Des budgets rendant difficiles le respect des normes législatives

Le Conseil de l'Immobilier de l'État (CIE)²²², créé en 2006, constate, dans son rapport du 30 janvier 2013 « *Cinquante propositions pour moderniser la politique immobilière de l'État* »²²³, après avoir rappelé l'objectif de « disposer d'un parc immobilier en bon état et répondant aux objectifs d'un « État exemplaire », notamment par le respect des objectifs d'accessibilité et de performance énergétique et environnementale, que « *Les difficultés de la politique d'entretien rendent difficiles le respect des normes législatives en termes d'accessibilité et de Grenelle de l'environnement* », et que « *le financement du Grenelle pose problème* ». Les budgets ne sauraient avoir capacité de satisfaire à la fois:

- l'entretien « normal » ;
- le surcroît de travaux rendu nécessaire par un certain sous-entretien antérieur ;
- les opérations de la réforme territoriale ;
- les dépenses exceptionnelles liées aux exigences d'accessibilité de la loi de 2005 ;

²²⁰ Voir cette directive publiée au Journal officiel de l'UE du 14 novembre 2012: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:FR:PDF>.

²²¹ En France, seuls sont concernés les bâtiments des administrations centrales, pas ceux des collectivités territoriales

²²² organe consultatif placé auprès du ministre du budget, des comptes publics et de la réforme de l'État, chargé du domaine, et composé de parlementaires et de personnalités qualifiées dans le domaine de l'immobilier. Voir : <http://www.economie.gouv.fr/cie/conseil-immobilier-letat-0>

²²³ Voir : http://www.economie.gouv.fr/files/Moderniser_la_politique_immobiliere_Etat_synthese.pdf

- et enfin, les grandes ambitions du Grenelle.

Il considère qu'un effort de programmation rigoureux peut seul permettre l'articulation de l'ensemble de ces obligations. L'État doit programmer les opérations permettant d'atteindre cette réduction énergétique par tranches pluriannuelles.

4.2.7.4. Un manque de cohérence

Le CIE constate enfin que la politique de l'environnement souffre des incohérences globales de la politique immobilière de l'État. La « démarche exemplaire » est ralentie par la multiplicité des acteurs et les lacunes d'une gouvernance tricéphale, dans laquelle la coopération entre les trois ministères n'est pas clairement structurée. Cette difficulté n'est pas propre aux engagements du Grenelle de l'environnement; elle se retrouve dans l'ensemble de la politique immobilière de l'État.

Les obstacles pratiques aussi sont divers. Les données manquent sur le parc, par exemple l'immobilier de l'État -soit 35 Mm²- fait, suite à l'instruction relative à l'État exemplaire signée par le Premier ministre le 17 février 2015, l'objet d'un recensement et métrage partiel (essentiellement les grandes surfaces) effectué par France Domaines afin d'établir une base de données permettant de commencer à travailler en la matière. Le principal gisement envisagé semble cependant la réduction des surfaces. De plus les (actuels) bas prix de l'énergie rendant encore moins rentables économiquement les rénovations, Enfin les personnes bien formées en rénovation et maîtrisant les aspects transversaux en la matière, sont encore en nombre insuffisant,

4.2.7.5. Une ambition à réaffirmer

La LTECV d'août 2015 a pourtant repris et renforcé les objectifs pour l'immobilier de l'État, en stipulant dans son article 8-II²²⁴ : *« Toutes les nouvelles constructions sous maîtrise d'ouvrage de l'État, de ses établissements publics ou des collectivités territoriales font preuve d'exemplarité énergétique et environnementale et sont, chaque fois que possible, à énergie positive et à haute performance environnementale. Des actions de sensibilisation à la maîtrise de la consommation d'énergie sont mises en place auprès des utilisateurs de ces nouvelles constructions. »*

La LTECV, de manière générale, oblige à embarquer des travaux de rénovation énergétique lors de ravalements de façade, réfection de toiture, etc (décret du 30 mai 2015). Elle prolonge l'obligation de travaux dans les bâtiments à usage tertiaire publics et privés jusqu'à 2050, par période de 10 ans (décret dit tertiaire en cours) ; elle fixe l'objectif de 60 % d'économies d'énergie finale à réaliser sur le parc d'ici 2050 par rapport à 2010. Et depuis le 15 avril 2016 l'État est tenu d'acheter ou prendre à bail des bâtiments à haute performance énergétique.

Par ailleurs, le gouvernement a pris des mesures pour améliorer la gouvernance de son immobilier. D'une part, le Conseil des ministres a le 20 janvier 2016 cadré la nouvelle organisation de la fonction immobilière : *« au sein du ministère des finances et des comptes publics, le service France Domaine sera érigé en une véritable direction immobilière de l'État (DIE), relevant de la Direction générale des finances publiques. Cette direction s'appuiera localement sur un réseau de chefs de service régionaux disposant d'équipes renforcées et sur les préfets de région, qui représentent l'État propriétaire au niveau déconcentré. Les processus de décision seront revus, afin de faciliter la définition et l'application des normes immobilières par la nouvelle*

²²⁴ Un décret à paraître devrait préciser l'application de cet article

direction et les préfets de région. Enfin, la gouvernance interministérielle sera simplifiée et recentrée : une instance unique réunira les secrétaires généraux, sous le pilotage de la direction immobilière de l'État ». La CNIP²²⁵, annoncée par la circulaire du Premier Ministre du 27 avril 2016, a été mise en place le 6 juin 2016 et la DIE a été créée au courant de l'été 2016.

En somme, depuis 2013, la politique immobilière de l'État a du mal à se stabiliser, ce qui retarde gravement la rénovation énergétique du parc par rapport aux échéances fixées dans la loi Grenelle, par la directive européenne de 2012, et aux obligations rappelées par la LTECV. Du fait des contraintes budgétaire et autres, cette rénovation sera principalement orientée dans les autres besoins prioritaires de travaux et opérations.

Il faudrait d'abord commencer par un diagnostic plus précis, avec une catégorisation des bâtiments concernés en fonction des enjeux de rénovations, des types d'énergie utilisée, des retours d'investissement attendus, d'une certaine industrialisation, permettant de réduire les coûts, etc.

Il semble souhaitable, de se donner une méthode de priorisation des rénovations énergétiques, et de définir, dans le cadre d'une stratégie d'action, un programme d'investissement permettant de respecter progressivement les obligations de la France au regard de la directive européenne sur l'efficacité énergétique.

En ce qui concerne les collectivités territoriales, les engagements sont pris dans le cadre des Plans Climat Air Énergie, désormais devant être menés à l'échelle intercommunale.

La Caisse des Dépôts et Consignations gèrent un dispositif financier dédié, qui a été doté de 5 milliards € en 2014.

Mais la visibilité nationale, tant sur les actions que sur les résultats, reste faible.

4.2.7.6. Une récente feuille de route

Une feuille de route nationale « transition énergétique pour les bâtiments de l'État », encore en cours d'élaboration lors de la rédaction du présent rapport, prend la mesure de l'état des lieux et des difficultés rencontrées.

Elle prend pour objectif une économie énergétique de 60 % à réaliser d'ici 2050.

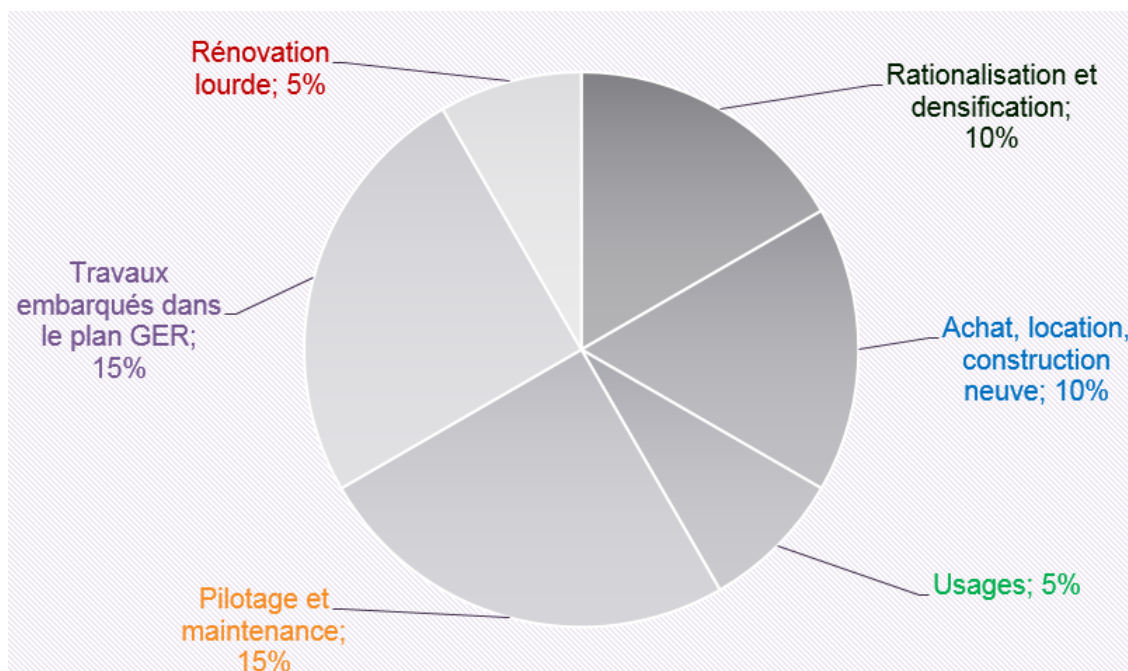
Elle propose huit recommandations de bon sens .

²²⁵ Conférence nationale de l'immobilier public



Les huit recommandations de la feuille de route – Source, Feuille de route nationale Transition énergétique pour les bâtiments de l'État, projet.

Les modalités d'action sont explicitées dans la figure suivante, et reposent principalement sur les travaux embarqués dans le plan GER (gros entretien-renouvellement, centré autour de 4 axes : sécurisation, pérennité, accessibilité, et performance énergétique, qui devra être intégrée), le pilotage et la maintenance (optimisation de la régulation et de la programmation horaire, renégociation des contrats de chauffage,...), puis l'achat et location de construction neuve, la rationalisation et la densification (poursuite des regroupements, relogements avec réduction des surfaces occupées), et enfin les rénovations lourdes (remise à neuf) et les usages (analyse, concours et émulation, éclairage,...).



Part de chaque levier d'action dans les 60 % d'économie d'énergie à réaliser d'ici 2050 (la somme des pourcentages est donc 60 % et non 100%) – Source, Feuille de route nationale Transition énergétique pour les bâtiments de l'État, projet.

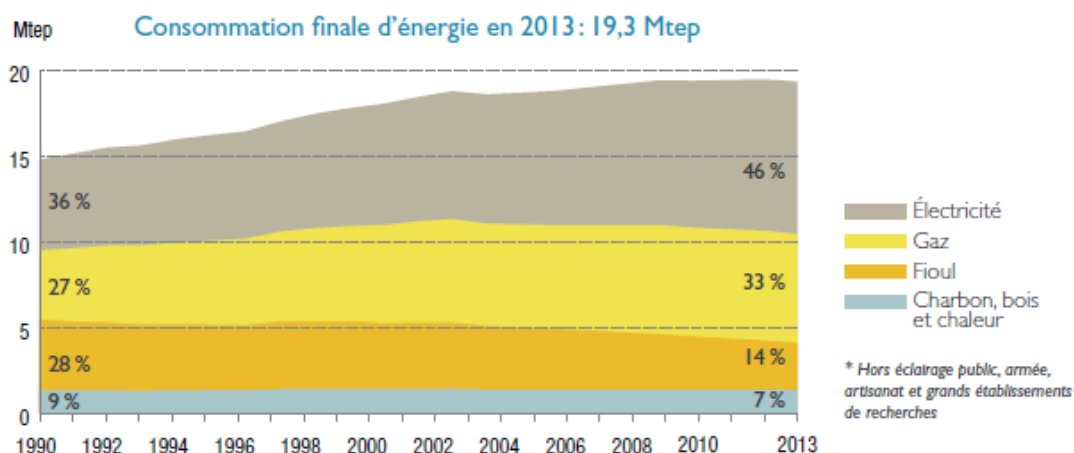
Une telle feuille de route est bienvenue. Ses effets seront à suivre avec attention.

4.2.8. La problématique spécifique du tertiaire

4.2.8.1. Une évolution dynamique de la consommation d'énergie et des émissions

Selon l'ADEME, « le secteur tertiaire est composé des activités d'enseignement, de santé, de commerce, des administrations, de la restauration et de l'hébergement, ou encore des banques. Les bâtiments abritant ces activités représentaient en 2013 une surface chauffée de près de **940 millions de m²** pour une consommation d'énergie finale de 19,3 Mtep, soit moins de 15 % de la demande d'énergie française. (...) Bien que le secteur tertiaire soit responsable de 6 % des émissions françaises de GES (hors UTCF) et occupe une place modeste dans le bilan énergétique français, il constitue malgré tout un enjeu important des politiques de maîtrise de la demande d'énergie puisqu'il affiche une augmentation moyenne de sa consommation finale d'énergie de 2 % en par an pour l'électricité depuis 2000, et 0,6 % par an pour l'ensemble des énergies (une légère baisse de la consommation finale d'énergie du secteur est cependant à noter depuis 2011). »²²⁶ Ainsi les consommations d'énergie du tertiaire ont crû jusqu'en 2003 puis ralenti jusqu'en 2011 avant de se stabiliser.

²²⁶ Source : « Les chiffres clés du climat air énergie », p. 76, ADEME, juillet 2016, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

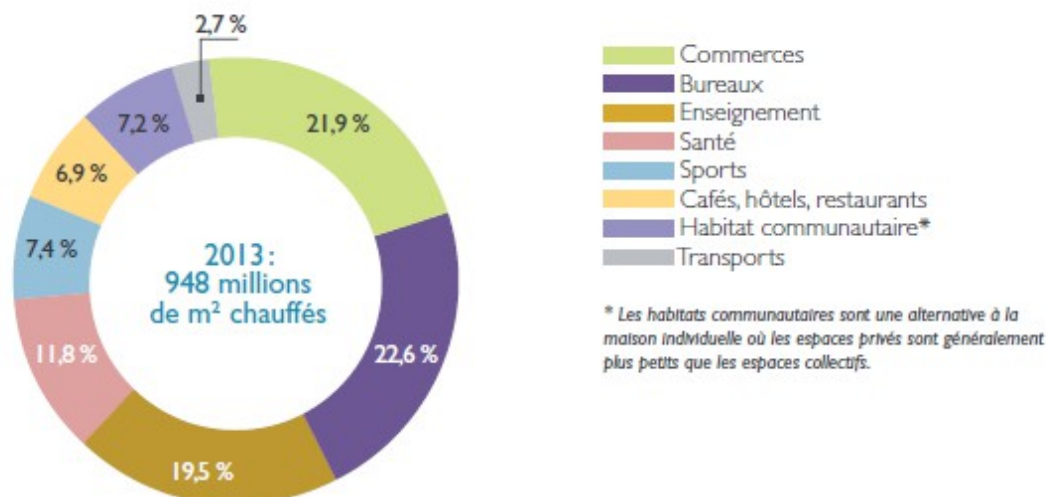


Source : CEREN - «Données statistiques du CEREN» - août 2015
 Champ : France métropolitaine, Données corrigées du climat

Évolution des consommations finales d'énergie du secteur tertiaire par type d'énergie – Source : « Les chiffres clés du climat air énergie », p. 78, ADEME, juillet 2016, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

Dans le secteur du bâtiment, le poids des consommations énergétiques du tertiaire et du résidentiel se situent grosso modo dans un rapport 1/3-2/3.

Comme mentionné *supra* le secteur tertiaire est très hétérogène :



Source : CEREN - «Données statistiques du CEREN» - août 2015 (données 2013)
 Champ : France métropolitaine

Répartition de la surface chauffée des locaux tertiaires par branche – source, : « Les chiffres clés du climat air énergie », p. 80, ADEME, juillet 2016, <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

La connaissance statistique des parcs, des consommations et des gisements de progrès est améliorable. L'un des enjeux passe par une meilleure connaissance des modes de gestion. Or, la classification par destination dans l'INSEE (hôtels, locaux d'enseignements, etc.) ne donne aucune information sur qui gère et comment.

Hormis quelques dispositifs d'observation d'initiative privée (comme l'observatoire de l'immobilier durable / OID²²⁷), trop partiels (comme le suivi par EFFINERGIE des postes réglementaires, sans vision globale en énergie primaire), il manque un observatoire national de l'immobilier tertiaire, organisant la collecte précise d'informations sur la situation au regard des consommations d'énergie finale et des émissions de GES, en les reliant précisément aux modes de gestion et à la typologie. En fait, ceci supposerait la mise en place d'un « carnet de santé » pour chaque bâtiment tertiaire.

4.2.8.2. Quelques réglementations ciblées

La RT 2012 s'applique aux bâtiments tertiaires neufs et impose les critères d'un bâtiment basse consommation (BBC). Pour les bâtiments existants, la RT 2007 et 2008 s'applique ; de plus le code de la construction modifiée par la LTECV prolonge l'obligation de travaux de rénovation énergétique, avec un objectif à long terme de réduction de la consommation de 60 % en 2050 par rapport à 2010. Une part du tertiaire public a été soumise à audit énergétique. Des plans territoriaux et schémas régionaux déclinent localement la politique climatique énergétique. Du point de vue spécifique des GES, les entreprises de plus de 500 personnes (250 en outre-mer) doivent établir tous les quatre ans un bilan des émissions GES.

Le secteur tertiaire est explicitement visé par la SNBC, qui indique ([voir plus haut 3.2.](#)) : « *Inciter les gestionnaires de parc tertiaire, notamment les petites structures, à mener une stratégie d'investissement visant l'amélioration de la performance énergétique et la diminution des émissions de leur bâtiment.* » En 2016, le gouvernement a lancé une consultation pour préparer la publication (avant la fin de l'année) d'un décret portant obligation de réduire de 25 % les consommations énergétiques des bâtiments tertiaires à l'horizon 2020.

4.2.8.3. Quelques initiatives privées

Diverses initiatives ont, par le passé, déjà abordé le sujet de la consommation énergétique du tertiaire en fédérant des acteurs du secteur privé.

Par exemple, le Plan Bâtiment Durable a su mobiliser, depuis 2013, plus d'une centaine d'acteurs autour d'une charte dite « tertiaire » pour l'efficacité énergétique des bâtiments tertiaires publics et privés²²⁸. Cette charte requiert des signataires (acteurs privés ou publics) une déclaration des niveaux d'objectifs d'efficacité énergétique, un plan de progrès et un rapportage des projets atteints et difficultés rencontrées. Un troisième bilan vient d'être publié en octobre 2016²²⁹. Sa synthèse indique en particulier, pour les répondants, gestionnaires engagés dans la rénovation de leurs bâtiments tertiaires : « *les difficultés opérationnelles de l'exercice (...).* »

1 La construction de « l'image énergétique » de son parc est un exercice difficile et

²²⁷ Voir : <http://www.o-immobilierdurable.fr/>

²²⁸ Voir <http://www.planbatimentdurable.fr/charte-pour-l-efficacite-energetique-des-batiments-r204.html> . C'est aussi une des suites du rapport « Gauchot » de 2011 : http://www.planbatimentdurable.fr/IMG/pdf/rapport_obligation_renov_parc_tertiaire_nov_2011.pdf

²²⁹ <http://www.planbatimentdurable.fr/renovation-energetique-du-parc-tertiaire-la-a1040.html>

chronophage, depuis l'accès à l'information de consommation à son analyse ;

2 Les collaborations entre propriétaires-bailleurs et preneurs sont très souvent minimalistes, voire inexistantes, rarement fructueuses. Le processus d'annexe environnementale sans adhésion des parties n'est pas suffisant pour enclencher une collaboration et le sujet « énergie et environnement » est accessoire dans leurs relations ;

3 Les variations importantes de périmètre et les opérations de densification posent la question de l'évaluation dans les parcs qui ont fortement varié ;

4 Le coût des opérations reste important, qu'il faut absorber dans les cycles immobiliers. Les seuls signataires ne pouvant agir, généralement publics, l'étaient pour des raisons budgétaires. ». Les 37 répondants de l'enquête (sur 80 signataires de la charte) représentent 37 900 000m² de surface ou encore 3 % du tertiaire national ; avec des objectifs de réduction des consommations compris entre 6 et 40 %; ils attribuent « 13% de l'accomplissement de leurs objectifs d'économies d'énergie aux rénovations profondes, 31% à des plans de progrès en site occupé avec de l'investissement, 32,5% dans des plans de progrès liés au pilotage et enfin 13,5% de leur objectif sur un meilleur usage. ».

Une autre initiative privée a été engagée, quand des entreprises ont créé le 10 mars 2008 une association loi de 1901 pour lancer des actions concrètes : l'Institut français pour la performance du bâtiment. (IFPEB²³⁰) Il œuvre tant sur le champ des BEPOS, que de l'analyse des cycles de vie (ACV), par exemple en travaillant sur la « création de valeur extra-énergétique ». On peut en particulier signaler le concours « CUBE 2020 »²³¹, qui en sera en 2017 à sa troisième édition portée par l'IFPEB. Il consiste à appeler des entreprises à concourir dans l'atteinte simple d'économies d'énergie dans la gestion d'un bâtiment tertiaire. L'ADEME a soutenu une étude sociologique en 2016, afin d'en tirer les enseignements sur les comportements des salariés et équipes de gestion²³². Il est impressionnant de constater qu'avec peu de dépenses engagées, mais par quelques modifications de comportement, des économies d'au moins 25 % de consommation d'énergie sont atteintes en moins d'un an.

Par ailleurs, la Fondation Bâtiment Énergie²³³, qui a pour objectif de « *soutenir des projets de recherche permettant l'émergence de méthodologies et de technologies innovantes qui contribuent au Facteur 4* », a particulièrement travaillé un point important : la **Garantie de Performance Énergétique**²³⁴ (GPE).

On peut aussi noter l'émergence d'entreprises se spécialisant dans la recherche d'économie d'énergie, au moins à hauteur de 30 %, dans le fonctionnement de grands groupes.

Le gisement existe donc bien, même si les problématiques sont extrêmement diverses suivant les types d'activités : écoles, hôpitaux, centres commerciaux (où le gestionnaire n'a pas la main sur les divers occupants / locataires), etc.

Il reste que l'enjeu énergétique (sans parler du carbone, absent des préoccupations) est souvent marginal dans les décisions financières d'investissement pour une rénovation d'un bâtiment tertiaire. Un investisseur immobilier ne dépense que le strict

²³⁰ Voir <http://www.ifpeb.fr/>

²³¹ Voir <http://cube2020.eu/france/concours-developpement-durable/cube-2020>

²³² Voir recherche-action SOCIOCUBE : <http://www.ifpeb.fr/2016/05/18/retour-letude-sociocube/>

²³³ Elle associe en particulier EDF, ARCELOR-Mittal, Lafarge, etc.. Voir <http://www.batiment-energie.org/>

²³⁴ Voir <http://www.batiment-energie.org/index.php?p=17>

minimum en gestion courante, et ne se lancera dans une rénovation lourde que dans une optique de réinsertion dans le marché, avec un objectif de rentabilité financière maximale. Cette intervention lourde suppose un local vide, et donc ne peut se concevoir que dans un cycle long (de l'ordre d'une vingtaine d'année).

La parution fin 2016 du décret spécifique devrait permettre la relance d'une dynamique.

5. Synthèse et perspectives

Les recommandations du rapport CGEDD de 2013 sont dans une large mesure encore valables. Des avancées ont eu lieu en France depuis le précédent rapport, notamment par la loi pour la transition énergétique et la croissance verte de 2015. Cependant des efforts importants restent à faire pour assurer la réussite des politiques ambitieuses de transition énergétique dans le domaine du bâtiment. La mise en œuvre, prioritairement dans le domaine de la rénovation, doit prendre en compte l'offre, la demande et les enjeux économiques.

5.1. Mieux suivre ce qui se passe

Alors que l'amélioration thermique du bâtiment et la réduction des émissions de GES du secteur sont affichées comme une priorité, les pouvoirs publics n'ont qu'une vision partielle et tardive de ce qui se passe sur le terrain. Ils peinent en particulier à connaître en temps réel les travaux d'amélioration effectués, leur montant, et leur efficacité. L'appareil statistique est à améliorer de ce point de vue.

Ceci s'intègre et rejoint la recommandation n°1 du rapport CGEDD de 2013 : « *Organiser la fonction d' « observatoire du facteur 4 » avec les acteurs en place, en faisant converger système de mesure, évaluation des politiques publiques, évaluation des perspectives technologiques et économiques, vulgarisation et pédagogie.* » Elle pourrait donc être complétée et déclinée par une recommandation du type : organiser la fonction d'observation du facteur 4 dans le secteur du bâtiment. Ce dispositif pourrait relever du conseil supérieur de la construction et de l'efficacité énergétique²³⁵.

5.2. Donner la priorité à la réduction des émissions de GES et approfondir l'enjeu de la production d'énergie par et pour le bâtiment

Les deux notions de diminution de la consommation énergétique et de diminution des émissions de GES ne sont pas exactement substituables.

L'effort demandé au bâtiment l'est pour des raisons de facture énergétique, de pouvoir d'achat, de réduction des importations (fioul, gaz) mais désormais de plus en plus en raison des préoccupations climatiques. La réduction des émissions de GES devient la priorité.

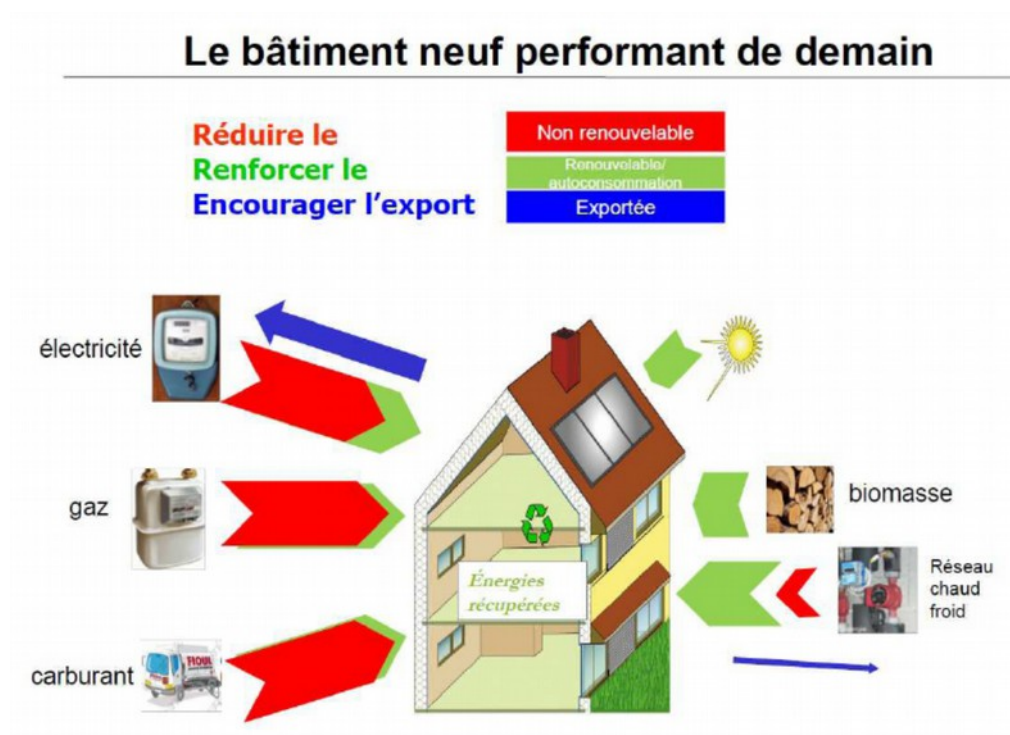
Compléter la réglementation en tenant compte de l'énergie mais aussi des émissions (y compris des émissions grises) permet donc d'avoir une meilleure vision d'ensemble. C'est l'orientation prise avec les expérimentations BEPOS + carbone annoncées en juillet 2016, en vue de préparer une réglementation environnementale en 2018.

Au-delà de l'isolation, de l'orientation, des équipements, des 5 usages conventionnels pris en compte par la RT 2012, l'intervention sur la production d'énergie (par exemple pour le chauffage) est essentielle. Les courbes d'abattement des émissions de GES classées par coût croissant font apparaître au-delà de la RT 2012 l'intérêt du bois

²³⁵ CSCEE, créé par le [décret n° 2015-1554 du 27 novembre 2015](#), en application de l'article 10 de la LTECV.. Voir : <http://www.logement.gouv.fr/conseil-superieur-de-la-construction-et-de-l-efficacite-energetique-cscee>

comme source de chaleur, du remplacement des chaudières fioul, des pompes à chaleur. Il convient de promouvoir ces dispositifs.

De plus les ministres en charge de l'énergie, du climat et du bâtiment ont annoncé, le 1^{er} juillet 2016, le lancement de l'expérimentation d'un label « énergie-carbone » pour préparer la prochaine réglementation thermique pour les constructions neuves. La future réglementation thermique (ou plutôt « énergétique ») devra intégrer la production d'énergies renouvelables, en alliant la cible d'un bâtiment à énergie positive (BEPOS) et la prise en compte de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (« carbone »). L'enjeu est ainsi illustré²³⁶ :



Source : In dossier de presse « application de la loi du 17 août 2015 – La transition énergétique pour la croissance verte – titre II : mieux construire et rénover les bâtiments pour économiser l'énergie, faire baisser les factures et créer des emplois. » 1^{er} juillet 2016, Ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en charge des relations internationales sur le climat – Ministre du Logement et de l'Habitat durable.

On peut d'ailleurs s'interroger sur la faisabilité de se donner le même objectif en matière de rénovation, ou au moins tendre vers cette approche mixant isolation et production d'énergie.²³⁷

²³⁶ In dossier de presse « application de la loi du 17 août 2015 – La transition énergétique pour la croissance verte – titre II : mieux construire et rénover les bâtiments pour économiser l'énergie, faire baisser les factures et créer des emplois. » 1^{er} juillet 2016, Ministre de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, en charge des relations internationales sur le climat – Ministre du Logement et de l'Habitat durable.

²³⁷ C'est l'approche prise par les Pays-Bas, au travers de leur programme « Energiesprong » ? (voir <http://www.energiesprong.nl/> ou http://www.lemonde.fr/smart-cities/article/2016/05/20/un-projet-de-renovation-massive-de-logements-a-energie-zero_4923207_4811534.html ou http://www.lemoniteur.fr/article/renovation-energetique-adapter-le-modele-hollandais-energiesprong-au-territoire-francais-32391691_)

La mission reprend donc à son compte la recommandation 20 du rapport CGEDD de 2013 : « Dans le domaine du bâtiment, redonner la priorité à la lutte contre les émissions de GES ; reconsidérer à cet égard le principe de l'évaluation en énergie primaire ».

5.3. Une action auprès des grands maîtres d'ouvrage et pour les bâtiments publics

Les grands maîtres d'ouvrage sont plus à même que les individus de lancer le mouvement de réhabilitation.

Les organismes HLM ont amorcé un effort significatif et sont sur un rythme de 100 000 logements réhabilités par an.

Les gros bailleurs peuvent avoir des obligations réglementaires de réhabilitation, dans le cadre d'une déclinaison des obligations de réhabilitation pour le tertiaire²³⁸.

La directive relative à l'efficacité énergétique requiert la rénovation énergétique de 3 % du parc public chaque année ou des économies d'énergie équivalentes.

Les collectivités publiques doivent trouver les moyens de financer l'amélioration de leur parc. L'État en particulier doit trouver auprès de la CDC les ressources financières nécessaires. Les régions peuvent être incitées à améliorer leurs bâtiments d'enseignement via les contrats de partenariat passés avec L'État. Tout cela suppose, de manière préalable, un état des lieux précis du parc et du gisement d'amélioration afin de mieux cibler les actions.

5.4. Gisements d'amélioration

L'ADEME, dans sa stratégie « rénovation énergétique des bâtiments dans l'objectif du Facteur 4 – période 2013 / 2020 »²³⁹, chiffre les gains possibles dans les bâtiments (voir tableau ci-dessous).

Pour le résidentiel :

Gisements techniques théoriques en secteur résidentiel (Source ADEME)

²³⁸ Rappel : L'article 17 de la LTECV prévoit une obligation de rénovation prolongée par décennie de 2020 à 2050 avec un niveau de performance renforcé pour chaque décennie avec un objectif de consommation d'énergie finale du parc réduite en 2050 d'au moins 60 % par rapport à 2010. Dans le tertiaire (pour lequel une obligation de travaux de rénovation énergétique était déjà prévue dans la loi Grenelle 2 de 2010), cette exigence doit se traduire par un décret (en consultation fin octobre 2016) concernant les surfaces supérieures à 2000 m², qui ajoute aux objectifs du Grenelle une obligation de réduction de consommation de 25 % à l'horizon 2020 (ou alternativement un seuil de consommation d'énergie primaire par m² et par an) et la fourniture d'un scénario de réduction de 40 % à l'horizon 2030. Des alternatives sont possibles sur les coûts sont excessifs (200€/m², et plus de 5 ans de temps de retour sur investissement -10 ans pour l'État et les collectivités territoriales). Aucune sanction n'est cependant prévue.

²³⁹ Voir : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/strategie-renovation-energetique-batiments-objectif-facteur-4-2014.pdf>

Actions	Gisement (TWh)
Isolation des toitures	56
Isolation des parois verticales	148
Vitrages et menuiseries performantes	33
Chauffages et ventilation performants	105
Équipements (Éclairage, réfrigérateur congélateurs, appareils de lavage, veille sur produits bruns)	14
TOTAL	356

Pour le tertiaire, le gisement technique est compris entre 76 et 167 TWh.

Les postes en général les plus traités par les propriétaires sont par nombre de logements touchés décroissant les fenêtres, les murs, les toitures et combles, le chauffage. Par ordre de nombre de rénovations performantes, et aussi par ordre de dépenses décroissantes ce sont les toitures, puis fenêtres, chauffages, et murs²⁴⁰. Le bilan est donc mitigé. Un effort apparemment excessif, comparativement aux autres, est consacré aux fenêtres. Ceci peut s'expliquer par une offre existante simple, avec une gêne limitée pendant les travaux, adossée à une certaine industrialisation et à un marketing assez fort de la part des professionnels²⁴¹.

5.5. Rénovation globale

La question de la rénovation ou de la rénovation par étapes successives a été étudiée *supra*. Il peut y avoir un intérêt, lorsque cela est faisable, à concevoir un projet global de rénovation plutôt que des opérations segmentées, avec mutualisation de certains coûts et évitement d'effets de bord, et donc à aller vers des travaux plus ambitieux, plus globaux, incluant aussi l'isolation extérieure, avec une garantie de résultat, quitte à prévoir un dispositif d'incitation progressif.

L'approche actuelle semble pragmatique, et ne plus exclure a priori les rénovations partielles au motif d'un assèchement des gisements d'économie. Par contre il est recommandé, dans le cas de rénovations partielles, d'inscrire les différentes étapes dans un projet global.

Le plan affiché de 500 000 logements rénovés par an peut gagner en précision ; actuellement les rénovations prises en compte sont celles « performantes » et « très performantes », c'est-à-dire avec respectivement deux « gestes » performants, et deux gestes performants plus un « geste » de performance moyenne ; on peut souhaiter des ambitions plus précises et aussi favoriser l'approche globale (comme par exemple dans le décret sur la rénovation du tertiaire en cours de consultation avec la demande d'une réduction des consommations de 25 % à l'horizon 2020 et d'un scénario de réduction de 40 % des consommations à l'horizon 2030), voire étudier l'industrialisation, les incitations financières, etc.

²⁴⁰ http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/open_2015_8679.pdf

²⁴¹ Cette même « agressivité » commerciale peut amener à changer de chaudière, sans préoccupation de la limitation des gaz à effets de serre, et sans isolation préalable : là encore, une offre commerciale simple, et une intervention ciblée, rapide, avec une industrialisation arrière.

L'esprit de la recommandation 25 du rapport du CGEDD de 2013 reste donc valable : *« Améliorer la connaissance du « gisement » d'économies de CO2 dans le bâtiment et de la rentabilité globale de chaque catégorie de travaux selon les hypothèses d'évolution des coûts de l'énergie et tenir à jour cette connaissance. Promouvoir la recherche dans ce sens ».*

Le rapport complétait avec réalisme, au regard des difficultés constatées (recommandation 32) : *« Poser le plus tôt possible la question des limites et des obstacles qui risquent d'être rencontrés dans la rénovation thermique lourde du parc de bâtiments afin de s'engager sans attendre dans la recherche de solutions ».*

5.6. Des pistes de systématisation

Le succès indéniable des vendeurs / poseurs de nouveaux vitrages-menuiseries s'explique par une approche marketing et produit moderne, fondée sur la simplicité du produit et la garantie de résultat, permis par une alliance entre une industrialisation de base, abaissant les coûts, et une présence locale proche du client. Ce modèle se retrouve dans le domaine des cuisines intégrées par exemple.

En matière de rénovation lourde et globale, il peut être opportun, en matière de méthodes au moins, de passer du sur-mesure au prêt-à-porter²⁴².

Ceci suppose de combiner deux évolutions importantes :

- l'industrialisation et la systématisation des produits et méthodes, par préfabrication (ce qui peut relever de grandes entreprises nationales), et/ou par la standardisation (avec des solutions techniques de référence²⁴³, élaborées localement au regard du contexte territorial / climat, ressources comme le bois, milieu professionnel, etc.) ;
- une offre locale globale, garantissant une intervention de qualité à coût maîtrisé, par des associations de PME et artisans, via des réseaux ou des groupements ;

et, avec le défi supplémentaire d'allier l'approche purement bâtiment et la production d'énergie.

L'industrialisation est déjà pratiquée, comme vu ci-dessus, pour les fenêtres en PVC. Elle est aussi pratiquée pour les extensions en aluminium et aussi dans la filière bois émergente. Outre sa participation au stockage du carbone, le bois peut être aisément travaillé en amont dans une logique de préfabrication. Le gouvernement soutient fortement cette filière, par exemple avec le « plan industries bois »²⁴⁴ et la mise en place du Comité stratégique de la filière bois (CSF Bois²⁴⁵) en 2014, ou le récent (juin 2016) appel à manifestation d'intérêt pour des constructions d'immeubles en bois, via l'ADIV Bois²⁴⁶ (Association pour des immeubles à vivre en bois). D'ailleurs, l'institut technique dédié, le FCBA²⁴⁷ (Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction

²⁴² Tout en conservant des cabines d'essayage et des retoucheuses ! C'est l'enjeu de l'accompagnement.

²⁴³ cf. les STR recommandées par l'entreprise ENERTECH, et préconisées, par exemple, par le Conseil régional d'Alsace via son service intégré de rénovation énergétique, surnommé OKTAVE : voir « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016

²⁴⁴ Voir <http://www.entreprises.gouv.fr/politique-et-enjeux/plan-industrie-bois>

²⁴⁵ Voir <http://csfbois.fr/>

²⁴⁶ Voir <http://www.adivbois.org/>

²⁴⁷ Voir <http://www.fcba.fr/>

Ameublement), a publié en 2012, en particulier en lien avec la DGALN/DHUP, un guide de réhabilitation des maisons individuelles²⁴⁸.

L'aide ou l'incitation à l'émergence d'une offre industrielle, avec préfabrication, peut passer par la création d'un marché adapté : c'est ce que préconisent certains, en considérant qu'il faudrait mobiliser massivement les organismes d'HLM, mobilisables aisément car avec peu d'acteurs, ayant une bonne vision à long terme des enjeux économiques dans la gestion de leur patrimoine, et aptes à offrir des marchés importants, avec un bon encadrement de maîtrise d'œuvre.

Sans remettre en cause la cible finale essentielle de mobiliser les particuliers en maisons individuelles, la stratégie proposée tendrait à choisir la voie la plus simple et la plus rapide d'un effort massif de rénovation énergétique du parc HLM, pour amener à une rapide industrialisation, dont les dits particuliers profiteraient ensuite²⁴⁹.

5.7. La nécessaire simplification de l'offre

Sur le marché majoritaire des maisons individuelles, un impératif est sans doute la simplification de l'offre aux particuliers, rebutés par la complexité des démarches et des techniques, et méfiants face à des offres disparates, plutôt spécialisées, parfois peu fiables. Diverses initiatives locales²⁵⁰ se sont orientées vers le développement de rapprochement d'artisans et PME, soit au sein d'une association²⁵¹, soit dans des groupements temporaires ou permanents (réunions, formations, communication, etc.). Plusieurs expériences montrent que des groupements peuvent offrir des prix allant jusqu'à 30 % plus bas que le total d'offres séparées suivant les divers corps de métiers.

Au-delà des difficultés relationnelles à surmonter entre artisans, l'un des obstacles réside dans la difficulté d'obtenir un engagement des assurances pour une garantie décennale de ces groupements, un autre dans les difficultés de trésorerie qu'occasionnent les délais de paiement des diverses subventions et aides aux propriétaires. Une réflexion nationale avec les acteurs concernés (chambres des métiers, CAPEB, fédération française du bâtiment, etc.) devrait s'attacher à encourager et faciliter ces groupements²⁵², par exemple en étendant la labellisation RGE, vers une labellisation des groupements eux-mêmes (une « RGE GROUPEMENT »). Ce niveau national devrait permettre de travailler tant sur le cadre professionnel et technique, que sur le cadre financier, assurantiel, bancaire. Dès lors, ces groupements,

²⁴⁸ Voir http://www.fcba.fr/sites/default/files/files/FCBA_GuideRehabilMaisonIndiv_WEB.pdf

²⁴⁹ C'est d'ailleurs le cas aux Pays-Bas, où, après 4 ans de travail dans le logement social, le gouvernement s'attaque désormais plus fortement au champ des particuliers, en se fondant sur les réponses industrielles que les bailleurs sociaux ont permis de faire émerger. Les Pays bas vont aussi ouvrir le champ des bâtiments publics (écoles, etc.), toujours en s'appuyant sur l'outil industriel créé.

²⁵⁰ Dont la démarche notable (précitée en 4.2.2) proposée par l'entreprise ENERTECH et l'institut NEGAWATT, tendant à former des artisans pour les accompagner vers des groupements apportant une offre globale : DOREMI, ou « dispositif opérationnel de rénovation énergétique des maisons individuelles » (voir : <http://www.institut-negawatt.com/page.php?id=10>). Diverses collectivités territoriales ont mobilisé ce dispositif : dans la Drôme (« Biovallée ») ; en Alsace (« OKTAVE ») ; etc. (voir « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016, déjà cité)

²⁵¹ Tels (voir plus haut précités en 4.2.2) les RELAI (« REseaux Locaux d'Artisans Indépendants » du bâtiment), mobilisés en Bretagne par le Pays de Saint-Brieux, dans le cadre de son initiative « VIR'VOLT-ma maison », en liaison avec le « BATIPOLE », porté par la chambre des métiers et de l'artisanat des Côtes d'Armor : voir <http://www.batipole.org/particulier/>

²⁵² En prolongeant et surtout en mettant en œuvre les propositions du rapport « rénovation énergétique et filière bâtiment », de juillet 2014, du Plan Bâtiment Durable, précité : [voir ci-dessus 4.2.2](#)

éventuellement fédérés au niveau local, voire national, pourraient être des interlocuteurs privilégiés des entreprises offrant des produits préfabriqués et standardisés.

5.8. Au-delà de la rénovation BBC

Les diverses initiatives actuelles restent centrées sur le bâtiment « classique » lui-même, sans élargir l'approche, au-delà des chaudières, à des dispositifs d'autoproduction / autoconsommation, ressortant d'autres filières et professionnels²⁵³.

Une possibilité de généralisation serait de tendre, à terme, vers un objectif de rénovation BEPOS (et donc pas uniquement BBC).

Sur ce sujet de la rénovation BEPOS, le rapport d'avril 2016 de l'Académie des technologies sur les technologies et le changement climatique²⁵⁴ recommande de « transposer vers l'ensemble du bâti les avancées démontrées dans la construction neuve ; développer les échanges d'énergie et de chaleur » ; parmi les solutions visées, l'électronique de commande (qui renvoie à l'efficacité énergétique), les perspectives en matière de photovoltaïque (qui renvoie au BEPOS), mais aussi les avancées en matière de réseaux de chaleur (qui renvoie à l'approche d'îlots plutôt que des seuls bâtiments). Il s'agit donc de promouvoir des approches transversales, voire des solutions globales.

Dans cette hypothèse de rénovation BEPOS, a priori optimiste, il conviendrait donc de mobiliser les deux niveaux technique et transversal (industrialisation, préfabrication et standardisation nationale ; groupements et offres globales locales) vers une offre d'ensemble rénovation bâtiment + énergie, dans une optique BEPOS, ou mieux TEPOS. Ceci supposerait d'aller au-delà du milieu professionnel du bâtiment, en mobilisant les acteurs et professionnels de l'énergie. Les grands distributeurs d'énergie²⁵⁵ peuvent jouer un rôle (comme le préconisait le rapport CGEDD de 2013), étant au contact de leurs clients, propriétaires.

De telles réalisations, au début rares et exemplaires, pourraient se voir attribuer une labellisation spécifique.

5.9. Maîtriser les coûts, inventer une ingénierie financière et garantir les retours sur investissements

Bien que le facteur déclenchant la décision de rénover ne soit pas uniquement financier (*voir ci-dessous*), ce dernier reste néanmoins essentiel. Des coûts trop élevés, des difficultés à établir un plan de financement et à le mettre en œuvre, la complexité de la trésorerie alimentée par diverses aides, etc. constituent des obstacles au lancement d'une rénovation énergétique.

²⁵³ Voir la toute récente offre de la filiale spécialisée d'EDF, en autoproduction / autoconsommation solaire : <https://www.edfenr.com/> et en particulier, <https://www.edfenr.com/actualites/groupe-edf-officialise-virage-vers-lautoconsommation/>. On peut aussi citer l'offre d'ENGIE, « my power » : <http://www.engie-travaux.fr/production-d-electricite/travaux/autoconsommation-my-power-engie>. Ou celle d'une PME comme « Comwatt » : <http://www.comwatt.com/qui-sommes-nous/>

²⁵⁴ http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2016/04/21/12/45/33/406/Rapport_TCC_DEF.pdf

²⁵⁵ EDF a, par exemple, pris quelques initiatives de soutien d'actions locales, comme en Bretagne, avec le Pays de Saint-Brieuc ou avec la commune de Commercy (voir : <http://www.savecom-commercy.fr/>), en particulier via sa démarche « villages 2050 », voir : http://rapport-dd-2010.edf.com/fr/enjeux_ancrage_territorial

La maîtrise des coûts peut passer, par des progrès technologiques, une rationalisation des méthodes de conception (maquette numérique par exemple), par une industrialisation – standardisation, et par une offre locale groupée. Mais elle suppose aussi des diagnostics fiables, et un suivi précis par les acteurs publics, pour éviter des effets d'aubaine et des dérapages. Certaines initiatives locales sont allées jusqu'à créer un service public, se positionnant comme un maître d'ouvrage délégué, avec donc une possibilité de grouper des chantiers chez plusieurs particuliers²⁵⁶. La majeure partie des initiatives locales prennent en compte la mise en place d'un conseil direct aux particuliers, la réalisation à domicile d'un diagnostic énergie se traduisant par une recommandation de travaux, puis, souvent, une aide au cahier des charges.

Le deuxième aspect, reste la maîtrise des risques financiers pour le propriétaire, en lui offrant une visibilité, voire une garantie²⁵⁷ sur le montage financier. Or, la première ressource financière reste le patrimoine immobilier lui-même, ainsi que le montant des factures énergétiques avant intervention²⁵⁸. Le niveau des remboursements des éventuels emprunts (après subventions et aides) plus les factures énergétiques résiduelles doit se placer en deçà de l'enveloppe initiale des factures d'énergie. Ceci suppose de se projeter parfois dans un long terme, au-delà des durées classiques des prêts à la rénovation (plus proches des prêts à la consommation que des prêts à l'acquisition immobilière). Si les interventions garantissent (y compris par un suivi post travaux) la baisse des dépenses énergétiques, alors les banques seront plus à même de s'engager. Une telle garantie est cependant difficile à obtenir, en raison des coûts initiaux de rénovation, de l'effet rebond, des variations des prix de l'énergie notamment.

Cet objectif suppose donc un travail tant national que local entre les professionnels du bâtiment et les institutions financières et bancaires, les uns offrant une garantie de résultat, les autres s'engageant plus aisément et rapidement. Ce point est important dans le logement social, où les investissements de l'organisme bailleur social doivent se traduire par des baisses concrètes des charges pour les locataires. L'USH s'intéresse donc à des bâtiments à « pouvoir d'achat positif » !

C'est dans cette optique que divers établissements bancaires se sont déjà engagés aux côtés d'initiatives locales²⁵⁹.

Les problèmes de trésorerie peuvent gêner tant les propriétaires que les artisans. Il est donc essentiel de pouvoir mettre en place avances, préfinancements, voire tiers financement.

²⁵⁶ cf. le SPEE (Service Public de l'Efficacité Énergétique) de Picardie, voir : <http://www.pass-renovation.picardie.fr/> et <http://www.picardie.fr/La-Region-cree-le-Service-Public>

²⁵⁷ Une garantie technique de résultats, chiffrables en gains en euros, est un pas essentiel. C'est l'orientation des réflexions de la Fondation Bâtiment Énergie pour une Garantie de Performance Énergétique : [voir ci-dessus 4.2.7.](#)

²⁵⁸ Certains résument simplement l'objectif : « se payer sur la bête » ! C'est de fait l'approche du gouvernement néerlandais, dans sa démarche Energiesprong (précitée), allant jusqu'à ne prévoir aucune subvention, le locataire ne payant plus de facture énergétique (maison « zéro énergie »), mais uniquement un loyer plus élevé à son propriétaire public, le surloyer étant inférieur à la facture préalable de l'opérateur énergétique. Mais les entreprises garantissent la « zéro énergie » sur trente ans.

²⁵⁹ Comme la Banque Populaire des Alpes avec le Pays Voironnais (Isère), ou les cinq banques (Crédit mutuel, CIC Est, Caisse d'Épargne, Crédit Agricole, Banque Populaire) en Alsace offrant des taux et conditions avantageuses pour les propriétaires accompagnés dans leurs rénovations (voir « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016, déjà cité).

La LTECV permet de donner un cadre à la mise en place de tels dispositifs, qui fonctionnent déjà dans certains territoires²⁶⁰. Les mesures d'accompagnement et de financement de la transition énergétique comportent notamment le crédit d'impôt transition énergétique (CITE)²⁶¹, l'éco-prêt à taux zéro (Eco-PTZ)²⁶², et la mise en place de sociétés de tiers financement²⁶³. Un allongement de la durée de ces Eco-PTZ pourrait aller dans un sens incitatif pour les propriétaires privés hésitant face à des investissements importants (de l'ordre de 35 à 45 000 €).

Le 23 juin 2014 a été ouverte la conférence bancaire et financière de la transition énergétique, en préparation de la LTECV²⁶⁴. Sur ce mode, il peut être utile de réfléchir à une action nationale, mobilisant les établissements financiers (banques, assurances, etc.), favorisant les initiatives locales d'ingénieries financières adaptée à la rénovation énergétique de l'habitat. L'appui du ministère en charge de l'économie et des fédérations de banques et d'assurances, serait utile.

5.10. Comprendre la demande et s'adapter aux marchés

Le marché du bâtiment, ou plutôt le champ d'amélioration énergétique dans le bâtiment, est très divers : les bâtiments se segmentent en les logements, les locaux professionnels (qui dépassent le secteur tertiaire), les bâtiments publics ; les activités se segmentent entre la construction neuve et la rénovation ; les prises de décisions se font différemment dans les logements locatifs sociaux, les copropriétés et les maisons des particuliers ; Les enjeux sont divers (avec une priorité énergétique et carbone pour les maisons individuelles) et dans chaque cas, les éléments cadrant la décision très contrastés (entre un seul décideur chez le bailleur social ou le particulier, jusqu'aux multiples co-décideurs des copropriétés ; appel courant ou non à un maître d'œuvre ou non ; etc.).

Il faut donc segmenter le marché, ce qui n'est pas incompatible avec la standardisation évoquée plus haut : la standardisation étant plus pertinente quand elle est adaptée à chaque segment homogène.

Le marché du logement social locatif peut être plus aisé à appréhender et plus apte à permettre l'émergence de processus industriels. Il convient de renforcer les efforts en ce domaine, dont le retour sera rapidement payant, y compris pour les autres marchés.

Le marché des copropriétés nécessite des approches spécifiques, peut-être plus fondées sur des réglementations (cf. par exemple la prise de décision à la majorité simple en matière de rénovation) et des dispositifs d'accompagnement social des copropriétaires en difficultés ; par exemple des personnes âgées bénéficiant de

²⁶⁰ cf. en Ile-de-France, le tiers financement offert par la SEM Energies POSIT'IF, plus ciblé sur la rénovation des copropriétés : « Energie POSIT'IF conçoit le projet, finance et réalise les travaux. Une fois la copropriété rénovée, le syndicat des copropriétaires rembourse la société de tiers financement par un versement régulier dont le montant tient compte des économies d'énergies générées.... ». Voir : <http://www.energiespositif.fr/> et « Rénovation énergétique de l'habitat – 15 initiatives de territoires », ADEME, septembre 2016, déjà cité

²⁶¹ Accessible à tous (propriétaires ou locataires), il couvre jusqu'à 30 % du montant des travaux de rénovation énergétique, plafonnés à 8 000€/personne ou 16 000€ pour un couple

²⁶² Accessible à tous les propriétaires, il peut monter jusqu'à 30 000€. L'objectif est de 100 000 prêts entraînant 2 milliards d'€ de travaux par an

²⁶³ Ces sociétés dérogent au monopole bancaire et apportent aux particuliers une offre complète (conseil, accompagnement, financement) et se développent d'ores et déjà en région

²⁶⁴ <http://www.amorce.asso.fr/fr/energie/actualites/pcaet-le-projet-de-decret-2016-est-soumis-consultation-en-ligne/> , <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Impliquer-les-citoyens-les.html>

l'allocation personnalisée d'autonomie (APA), peuvent souhaiter préserver leur liquidité et valorisation patrimoniale pour financer des séjours à venir en maison de retraite ou EPHAD.

Le marché de la rénovation des logements individuels, qui constituent la majorité du parc, est le plus complexe. Les comportements des propriétaires individuels ne sont pas uniquement liés à une rationalité économique. L'accompagnement de ces propriétaires particuliers est donc indispensable. Il pourrait être pertinent de rechercher des économies d'échelle dans cet accompagnement, en repérant des chantiers à mener dans un même secteur (rue, lotissement, etc.), de même type (isolation extérieure par exemple), maîtrisant ainsi plus les coûts, et facilitant la mobilisation de groupements d'entreprises locales (ayant donc une meilleure visibilité de plans de charge). Peut-être faut-il envisager une aide supplémentaire aux animations territoriales débouchant sur de telles opérations groupées. C'est d'ailleurs plus à cette échelle groupée que des solutions locales de production, stockage, distribution d'énergies renouvelables seront envisageables en complément des rénovations, permettant ainsi de transposer l'objectif « BEPOS + carbone » du neuf.

Le marché du tertiaire est lui-même à segmenter entre commerces (23 % de la consommation d'énergie), établissements d'enseignement (à maîtrise d'ouvrage de structures publiques pour l'essentiel ; 12 % de la consommation d'énergie), établissements de santé (12%), administration et bureaux (25%) ; cafés, hôtels et restaurants (11%).²⁶⁵

Mais, dans tous les cas, deux préoccupations doivent se rejoindre pour aller vers plus de garantie de résultat : l'objectif même de maîtrise énergie et carbone ; la confiance à donner et la visibilité sur les retours financiers attendus. La mise en place d'un contrôle énergétique a posteriori doit être recherché, et exigé en cas d'aide publique. L'alternative passe par des solutions techniques de référence agréées.

²⁶⁵ chiffres clés 2015 climat air énergie, ADEME, p. 78,
<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

6. Conclusion générale de l'annexe bâtiments

Face à l'ampleur des efforts à fournir pour atteindre le facteur 4, et au regard du poids du secteur des bâtiments, il convient de confirmer des objectifs ambitieux dans le domaine du bâtiment. L'objectif de référence est l'atteinte du standard de basse consommation (BBC), tant pour le neuf qu'en rénovation. Un objectif supplémentaire est la production locale d'énergie renouvelable (BEPOS + carbone), comme annoncé par le gouvernement le 1^{er} juillet 2016 en ciblant prioritairement les constructions neuves²⁶⁶, voire en élargissant si possible aux logements à rénover pertinents.

À plus grande échelle émerge une chaîne de passivité²⁶⁷ « territoires passifs + bâtiments passifs », permettant de limiter le recours aux systèmes techniques centralisés de production et consommation d'énergie, et de privilégier la production locale. Un cadre national ambitieux doit permettre des mobilisations locales ambitieuses.

Les développements précédents identifient, entre autres, quatre facteurs de succès :

- quand c'est possible, une industrialisation et standardisation, s'appuyant sur une offre professionnelle organisée, garantissant les résultats. Ceci passe notamment par une avancée expérimentale sur le patrimoine locatif social, pour créer les conditions d'émergence, mais aussi par un appui aux groupements d'artisans et PME ;
- une ingénierie financière adaptée, mobilisant les acteurs financiers (banques, assurances) ;
- une approche de marché, à l'écoute des clients finaux que sont les propriétaires et locataires, comprenant des actions territorialisées de proximité (à l'échelle du quartier, d'un groupe d'immeuble, d'un lotissement), afin d'optimiser les chantiers de rénovation et trouver des solutions locales adaptées de production, stockage et distribution d'énergies renouvelables ;

Ces développements doivent intégrer l'enjeu de la maîtrise des émissions de GES sans se cantonner aux économies d'énergie primaire.

Un état des lieux, un suivi de la mise en œuvre des mesures et des résultats apparaissent aussi utiles, au moyen d'un recueil de données précises incluant dans la mesure du possible l'énergie primaire et finale, les émissions de GES et l'empreinte GES.

En somme, il faut se donner les moyens d'atteindre l'objectif affiché du Facteur 4 en 2050. Le secteur du bâtiment, selon la SNBC, est tenu à une baisse de ses émissions de 54% à l'horizon du troisième budget carbone (2028) par rapport à 2013 (dont les émissions sont elles-mêmes 10 % supérieures à celles de 1990), et d'au moins 87% à l'horizon 2050 par rapport à 2013. Cela revient à atteindre, par rapport à 1990, le facteur 2 avant 2028 et un facteur 7 en 2050, sachant que des scénarios encore plus optimistes affichent des potentiels de réduction encore supérieurs. Il convient donc de mobiliser les professionnels et les territoires, avec une réelle stratégie de combat, de

²⁶⁶ voire en élargissant si possible à terme aux logements pertinents parmi les plus de 25 millions de logements à rénover

²⁶⁷ Le scénario négaWatt est bâti sur la progression : sobriété pour réduire la demande, puis efficacité pour réduire la demande à performance égale, puis ENR pour accommoder la demande résiduelle.

conquête du marché au service des habitants. Le travail est déjà bien engagé, il faut l'approfondir.

Le septième point clé du rapport CGEDD de 2013 pourrait donc être légèrement reformulé :

Le bâtiment constitue le gisement le plus immédiatement exploitable d'économies de GES, même si les coûts d'abattement peuvent y être élevés. La mission constate la bonne acceptation des réglementations dans le neuf, mais des signes d'essoufflement de l'effort dans le parc existant. Elle estime qu'il y a nécessité d'envisager des obligations de faire dans ce secteur (formulées autant que possible en termes de résultat) en s'appuyant le cas échéant sur les grands opérateurs (sur le mode des certificats d'économies d'énergie) mais aussi lorsque c'est possible sur une industrialisation / standardisation grâce à une offre professionnelle organisée, sur une ingénierie financière adaptée, sur une approche de marché, à l'écoute des clients finaux que sont les propriétaires et locataires, grâce en particulier à des actions territorialisées de proximité et des actions locales ambitieuses, sur les territoires à énergie positive, maîtrisant leur empreinte carbone, en particulier grâce à des plateformes de rénovation énergétique aux compétences élargies.

Recommandations du rapport de 2013 concernant le secteur du bâtiment

15 Recenser les facteurs (y compris les normes réglementaires) qui favorisent actuellement l'artificialisation des sols.

L'artificialisation des sols concerne environ 600 km²/an et un objectif de la SNBC est de la réduire à 100 km²/an en 2030. Les causes de l'artificialisation semblent bien connues : hors habitat, les implantations commerciales et le développement de l'espace public ; et pour l'habitat, développement augmentation de la population, augmentation du revenu disponible et de la surface habitable, baisse du coût des transports, appétence pour les zones « à la campagne », accroissement rapide du nombre de ménages, notamment sous l'effet des phénomènes de décohabitation (+ 38 % de 1980 à 2013, contre + 18 % pour le nombre d'habitants), et accroissement de la part de l'habitat individuel (57 % en 2013). Le phénomène dominant est l'artificialisation au voisinage des grands centres et le long des grands axes de communication. Le sujet des normes réglementaires et de l'impact de la fiscalité est sans doute moins connu. En tout état de cause, les comportements sont déterminants et leur inflexion malaisée. La recommandation est partiellement obsolète, ce qui ne dispense pas de poursuivre l'observation. A contrario, l'artificialisation des sols pourraient être partiellement ralentie soit par un encadrement des SCOT et des PLU dans le code de l'urbanisme, soit par une action concertée des MRAe lors de l'évaluation environnementale des PLU et des SCOT.

16 Développer des recherches sur les causes (tenant notamment à la dérégulation du marché foncier et au droit de l'urbanisme) qui favorisent le développement de l'habitat dispersé et les déplacements motorisés.

Il existe une littérature académique abondante sur les interactions transport-urbanisme, des travaux par la SGP (Société du Grand Paris) de comparaison de modèles LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) au niveau national. Mais les recherches sont coûteuses et requièrent de l'expertise rare, d'où l'intérêt de mutualiser les efforts, avec des souhaits d'animation au niveau national d'une communauté des modélisateurs LUTI (État, régions, agglomérations, SGP...) pour mettre en commun les expériences et favoriser la cohérence d'ensemble. La recommandation reste valable.

17 Développer études et recherches sur les conséquences en termes d'émission de GES des différentes formes d'artificialisation des sols et notamment de l'éclatement urbain.

Des recherches nombreuses existent, qu'il s'agisse d'études d'élasticité précises sur l'empreinte carbone du développement des banlieues (vivre en couronne consomme six pleins d'essence de plus par an par foyer ; doubler la densité résidentielle résulte en l'économie de deux pleins par an par foyer...) ou de considérations plus générales sur la ville durable²⁶⁸. Voir recommandation 16.

18 Envisager le bois stocké (par exemple dans la construction) comme un moyen compétitif de séquestration du carbone et mettre en œuvre un programme cohérent de mobilisation et de valorisation de la ressource forestière

Voir recommandation 18 précédente. Le PNFB doit dynamiser la gestion forestière au travers de six axes dont un relatif au soutien de la R&D sur l'amont forestier et la sylviculture. La question de la faisabilité d'une gestion plus active des forêts reste par contre posée, en raison de particularités liées aux essences (feuillus surtout alors que

²⁶⁸ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Etalement-urbain-et.html>

les capacités de sciage portent plutôt sur les résineux), à l'éclatement des propriétaires (même si 10 % des propriétaires possèdent 75 % du bois, ce qui justifie le ciblage par le PNFB des propriétés de plus de quatre hectares), aux questions d'accès (le PNFB recommande d'ailleurs d'améliorer l'accessibilité des massifs), à l'importance de la forêt non gérée en France, etc. La recommandation reste donc actuelle même si des travaux sont en cours.

20 Dans le domaine du bâtiment, redonner la priorité à la lutte contre les émissions de GES ; reconsidérer à cet égard le principe de l'évaluation en énergie primaire.

La réglementation à finalité également environnementale prévue pour 2018, pour prendre la suite de la RT 2012, prend en compte les émissions carbone. L'évaluation en énergie primaire n'est par contre pour l'instant pas remise en cause, d'autant plus qu'elle découle d'une directive européenne. La recommandation a donc partiellement été suivie de mesures en son sens. Elle demeure pertinente.

21 Dans le domaine du bâtiment, poser clairement le plus tôt possible les problématiques d'écart entre les économies théoriques et les économies constatées de façon à engager la recherche de solutions. Développer la recherche et les études permettant de comprendre les causes de ces écarts, pour s'efforcer d'y remédier.

Cette recommandation, au vu de l'importance du secteur du bâtiment et des effets rebonds, ainsi que du dramatique écart entre rythme de rénovation souhaité et observé, reste pertinente malgré l'importance des travaux qui lui sont consacrés.

Ce point crucial est à bien prendre en compte, non seulement en termes de résultats des politiques publiques et objectifs nationaux, mais aussi lorsque la garantie de résultat participe du montage financier, soit en valorisation « verte » attendue du patrimoine, soit en conséquences concrètes sur la baisse de facture énergétique, permettant de rembourser les investissements. La crédibilité de la démarche de rénovation et sa popularisation en dépendent aussi

22 Confier aux grands opérateurs (notamment fournisseurs d'énergie) la mission de promouvoir des formules « clé en main » auprès de leurs clients, comportant étude technique et financière des travaux, offre de financement et remboursement intégré aux factures d'énergie.

Cette recommandation repose sur une base saine, à savoir la nécessité d'un accompagnement « clé » en main afin de simplifier la décision du passage à l'acte et de garantir une vision d'ensemble, nécessaire en rénovation thermique. Quelques expériences sont en cours reprenant tout ou partie de cette recommandation. Le recours aux grands opérateurs, notamment fournisseurs d'énergie, n'est par contre pas nécessairement exclusif. Ces derniers ont été mis à contribution pour financer, via les certificats d'économie d'énergie, la lutte contre la précarité énergétique

23 Donner aux opérateurs précités des obligations annuelles de résultat relatifs à cette procédure « clé en main » sur le mode des certificats d'économie d'énergie.

Cette recommandation repose aussi sur une base saine, à savoir une obligation de résultat, basée sur des mesures fiables. Voir cependant recommandation 22.

24 Dimensionner ces obligations de résultat pour l'atteinte des objectifs fixés au niveau national en matière d'économies de GES (et non d'énergie).

Voir recommandation 23. Ces trois recommandations 22, 23 et 24 restent acceptables ; les récentes initiatives d'EDF et ENGIE en matière d'autoconsommation vont en partie en ce sens²⁶⁹, et les opérateurs fournisseurs d'énergie sont en effet en contact direct avec les clients / propriétaires. Ils peuvent fort bien connaître aussi la problématique des bâtiments ; il convient cependant de ne pas se limiter à leurs seules compétences.

25 Améliorer la connaissance du « gisement » d'économies de CO2 dans le bâtiment et de la rentabilité globale de chaque catégorie de travaux selon les hypothèses d'évolution des coûts de l'énergie et tenir à jour cette connaissance. Promouvoir la recherche dans ce sens.

La recommandation reste dans son esprit valable. Un travail additionnel d'acquisition et de fiabilisation de données, de segmentation, d'élaboration de matrices de coût de rénovation d'une classe énergétique à l'autre devrait être mené, tant en termes d'adaptation aux différents segments de bâtiments qu'en termes de qualification des résultats (taille d'échantillon, etc.). De plus, les évolutions récentes (décret en cours de consultation) en matière de rénovation du tertiaire, qui stipulent non seulement des économies d'énergie de 25 % en 2020 mais encore requièrent un scénario d'évolution vers -40 % en 2030, participent de cette approche d'ensemble de la rénovation.

29 Faire des paris, notamment à l'occasion de la réflexion sur les normes de construction pour 2020, sur les développements de « l'énergie 2.0 » et en tout cas laisser ouvertes les possibilités de déploiement de ces systèmes

Des réflexions sont en cours à ce sujet²⁷⁰, par exemple au sein du plan bâtiment durable dans la perspective des nouvelles réglementations, ou au sein de la DGEC sur l'autoproduction et l'autoconsommation, et plus généralement sur la question de la stabilité des réseaux. Le sujet dépasse d'ailleurs le secteur du bâtiment. La problématique du véhicule électrique et de l'exigence en termes de pics de puissance requis par la charge d'un parc conséquent (mais aussi des bénéfices du recours aux batteries de ce parc pour stabiliser le réseau), ou la disponibilité de points de charge chez soi et au bureau, en est un exemple. Les appels à projet « territoires à énergie positive pour la croissance verte », le déploiement des compteurs intelligents ou des réseaux intelligents peuvent constituer des expérimentations instructives. La recommandation reste d'actualité.

30 Développer les recherches sur les comportements réels vis-à-vis des paramètres environnementaux.

La différence entre les calculs conventionnels et les résultats réels s'explique largement par des comportements peu ou mal appréhendés, face qui plus est à des situations inédites. Les recherches sont actives, mais la recommandation reste

²⁶⁹ offre de la filiale spécialisée d'EDF, en autoproduction / autoconsommation solaire : <https://www.edfenr.com/> et en particulier, <https://www.edfenr.com/actualites/groupe-edf-officialise-virage-vers-lautoconsommation/>. Mais aussi offre d'ENGIE, « my power » : <http://www.engie-travaux.fr/production-d-electricite/travaux/autoconsommation-my-power-engie>

²⁷⁰ Pour mémoire, l'expression « énergie 2.0 » renvoie à un nouveau modèle du secteur de l'énergie, intégrant production, consommation et décision décentralisée, stockage de l'énergie, réseaux intelligents, et de manière générale convergence avec et recours important aux technologies de l'information et de la communication

d'actualité, qu'il s'agisse d'éducation, de sobriété, d'efficacité, d'effet rebond, de passage à l'acte de rénovation ou de décarbonatation d'un processus.

31 Engager des programmes importants de sensibilisation, de formation et d'information sur le changement climatique et les moyens concrets de réduire les émissions de GES envers les « corps intermédiaires » de professionnels au contact du public.

La recommandation reste d'actualité, en liaison avec le métier de la rénovation énergétique et de la rénovation ou construction bas carbone. La sensibilisation de la profession du bâtiment et le développement des compétences et de la prise en compte des interfaces avec d'autres corps de métier reste utile.

32 Poser le plus tôt possible la question des limites et des obstacles qui risquent d'être rencontrés dans la rénovation thermique lourde du parc de bâtiments afin de s'engager sans attendre dans la recherche de solutions.

Les obstacles sont entre autres des obstacles de connaissance, de compétence, de motivation et pédagogie, de coût, de financement et trésorerie, de fiabilité. Des solutions partielles existent sans doute, par exemple dans le bâtiment social, susceptible de solutions plus systématiques, dans les bâtiments de l'État avec la nouvelle feuille de route y afférente, dans le parc général avec des solutions innovantes, éventuellement au niveau d'îlots d'habitations. Elles sont susceptibles de constituer des bonnes pratiques imitables. La recommandation reste pertinente.

33 Mettre à profit les moments de crise pour engager les transformations nécessaires, lorsqu'à la fois l'opinion en comprend la nécessité et que l'offre technologique est disponible.

Le vote de la LTECV, la mise en place de la SNBC, la signature de l'accord de Paris, la mise en place d'un corridor carbone participent de ces transformations nécessaires, qui ont eu lieu en concomitance avec une appréhension accrue du danger climatique mais aussi dans un contexte de baisse probablement fragile des prix des énergies fossiles et d'une offre technologique partielle. La recommandation, très générale, reste pertinente.



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

Annexe thématique sur la production d'énergie

Rapport n° 008378-02
établi par

Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF (coordonnateur), Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT

Février 2017



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités
passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction
de ce rapport.

Sommaire

1. La production d'énergie : un dixième des émissions de GES lors de la production, sept dixièmes des émissions liées à l'utilisation.....	3
1.1. Des émissions majoritairement issues de la production d'électricité (très faiblement d'origine fossile) et du chauffage urbain (pour plus de moitié d'origine fossile).....	3
1.2. L'utilisation de l'énergie représente les trois quarts des émissions nationales.....	6
1.3. De très fortes ambitions de décarbonation du secteur.....	6
2. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios antérieurs à 2013.....	7
2.1. Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030 de juillet 2011.....	7
2.2. Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone octobre 2011 : vers une décarbonation presque totale du secteur de l'énergie, sous hypothèses encore fragiles.....	8
2.3. Rapport Énergie 2050 – février 2012 : pour une prolongation des centrales nucléaires.....	8
2.4. Scénario négaWatt – septembre 2011, actualisé en juillet 2013 : sobriété, efficacité, sortie du nucléaire et explosion des renouvelables.....	9
3. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios postérieurs à 2013.....	11
3.1. Vision 2030-2050 de l'ADEME – juin 2013 : un exercice basé sur la sobriété énergétique, les renouvelables et à géométrie variable sur le nucléaire.....	11
3.2. Les trajectoires du DNTE – juillet 2013 : des trajectoires contrastées se rapprochant de la LTECV selon les objectifs en 2030 ou 2050.....	16
3.3. Le projet DPPP – septembre 2015 : quantifier les effets des mesures au cours du temps.....	20
3.4. L'étude de l'ADEME sur un mix 100 % énergies renouvelables en 2050 - octobre 2015 : un exercice technique extrême notamment bridé par les difficultés d'acceptation.....	25
3.5. Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, rapport 2013 – janvier 2014 et le rapport ANCRE sur les « decarbonization wedges » - novembre 2015.....	28
3.6. La Loi de transition énergétique pour la croissance verte, août 2015 : une démarche volontaire en préalable de la COP21 et en cohérence avec les orientations européennes.....	29
3.7. La stratégie nationale bas carbone : des budgets sectoriels jusqu'en 2028.....	29
3.8. Les scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035	32
3.9. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) des énergies renouvelables en France métropolitaine – avril 2016.....	33
3.10. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de juillet 2016.....	36
3.10.1. France métropolitaine.....	36
3.10.2. Corse.....	37
3.10.3. Réunion.....	39
3.10.4. Autres.....	40
3.11. Tableau récapitulatif des exercices des projections post 2013.....	40
4. Aspects économiques, problèmes et solutions.....	43
4.1. La problématique des prix du carbone dans l'énergie.....	43

4.2. Des incertitudes importantes.....	45
4.2.1. <i>Technologie</i>	45
4.2.2. <i>Économie</i>	46
4.2.3. <i>Géopolitique</i>	46
4.2.4. <i>Politique de l'énergie</i>	46
4.2.5. <i>Acceptation sociale</i>	46
4.2.6. <i>Autoproduction et autoconsommation</i>	47
4.2.7. <i>Ruptures</i>	47
4.2.8. <i>Difficulté corollaire des prévisions</i>	47
4.3. Les trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût.....	48
4.4. Un système de production énergétique en évolution.....	49
4.4.1. <i>L'électricité nucléaire</i>	50
4.4.2. <i>Les technologies décarbonées matures (hors nucléaire)</i>	50
4.4.3. <i>Les technologies décarbonées en gestation</i>	54
4.5. Aspects transverses - l' « énergie 2.0 ».....	62
4.5.1. <i>Réseaux intelligents</i>	63
4.5.2. <i>Territoires à énergie positive pour la croissance verte</i>	63
4.5.3. <i>Compteurs communicants</i>	65
4.5.4. <i>Énergie centralisée ou décentralisée</i>	65
4.5.5. <i>Retour sur le rapport de 2013</i>	66
5. Synthèse pour le secteur de la production d'énergie.....	67
5.1. Importance de l'efficacité et de la sobriété énergétique.....	67
5.2. De fortes ambitions à long terme dans le secteur de l'énergie, tirées par des technologies encore à développer.....	68
5.3. Un contexte de mix énergétique non encore stabilisé.....	68
5.4. Des efforts demandés réduits à court et moyen terme qui ne doivent pas empêcher des mesures sans regret.....	68
5.5. Une distribution centralisée susceptible d'évoluer.....	68
Recommandations du rapport 2013 concernant le secteur de la production d'énergie.....	70

1. La production d'énergie : un dixième des émissions de GES lors de la production, sept dixièmes des émissions liées à l'utilisation

Le secteur de l'énergie en France métropolitaine produisait en 2010 12 % des émissions de GES si l'on se borne aux émissions nécessaires pour produire l'énergie (industrie énergétiques)¹ ; par contre elle produisait 94,3 % des émissions de CO₂ (71 % des émissions de GES) si l'on considère l'utilisation de l'énergie dans tous les secteurs de l'activité nationale².

1.1. Des émissions majoritairement issues de la production d'électricité (très faiblement d'origine fossile) et du chauffage urbain (pour plus de moitié d'origine fossile)

Si l'on actualise en 2013 et 2014³, les industries de l'énergie émettent 56,9 et 43,6 Mt CO₂ éq. soit 11,6 % et 9,5 % des émissions nationales de GES (486,5 et 458,9 Mt CO₂ éq). 70 % de ces émissions (soit 41,3 et 28,2 MtCO₂éq) viennent de la production d'électricité⁴ et du chauffage urbain, y compris l'incinération de déchets avec récupération d'énergie. Le reste vient du raffinage du pétrole (8,1 et 7,9 MtCO₂éq), de la transformation de combustibles minéraux solides (3,1 et 3,3 MtCO₂éq) et de l'extraction d'énergies fossiles (4,2 et 4,0 MtCO₂).⁵

La production d'électricité est déjà relativement décarbonée puisque en 2013 74 % de la production électrique est d'origine nucléaire (77 % en 2014, 76,3 % en 2015), 13 % hydraulique (12,6 % en 2014, 10,8 % en 2015) et 4 % énergies renouvelables ou EnR (5,1 % en 2014, 6,4 % en 2015)⁶. L'effort résiduel sur la production électrique porte donc sur la faible part de production d'origine fossile qui représente 9 % en 2013 et 5 % en 2014 (6,2 % en 2015). La décarbonation du secteur de production d'énergie passe aussi par un effort sur le chauffage urbain dont 57 % de l'énergie est d'origine fossile ; sur le secteur du raffinage, par optimisation du fonctionnement afin de maintenir une intensité CO₂ dans la norme européenne ; et sur les émissions dites fugitives liées à l'extraction.

La comparaison des années 2013 et 2014 montre l'influence de la température moyenne de l'année sur les émissions de GES dues à la production d'électricité et au chauffage urbain. L'année 2013 est un peu plus froide que la moyenne, l'année 2014 nettement plus chaude. Les centrales thermiques, pour faire face à des pointes de

¹ CITEPA SECTEN 2010. Ce sont donc des données métropolitaines, sans les DOM. En reprenant les chiffres clés du climat, édition 2016, qui documentent les données de 2013, on arrive à 12,68 % pour les émissions des GES dues à la production d'énergie, et 94,7 % des émissions CO₂ pour l'utilisation de l'énergie. Les ordres de grandeur restent proches, que l'on prenne le périmètre métropolitain (format SECTEN) ou le périmètre avec les DOM (formats CCNUCC, Kyoto, plan climat...)

² SOeS Chiffres clé du climat éd. 2011. Origine CITEPA.

³ Chiffres CITEPA, restitution au format « Plan Climat » <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>

⁴ Sur les 28,2 MtCO₂eq en 2014, la production électrique représente 19 MteCO₂, dont 13,5 pour le thermique à combustible fossile (source bilan RTE http://www.rte-france.com/sites/default/files/2015_bilan_electrique.pdf)

⁵ SOeS Chiffres clé du climat édition 2016 <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2369/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2016.html>

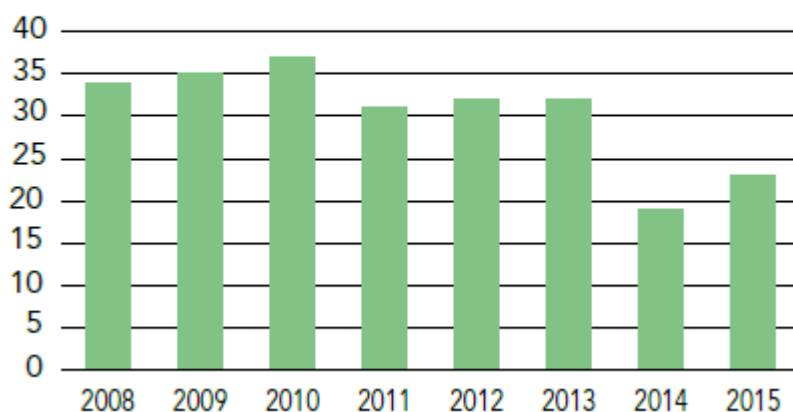
⁶ Pour les bilans de production d'électricité, voir les rapports produits par RTE.

consommations générées par le chauffage électrique, et les chauffages urbains sont moins sollicités en 2014.

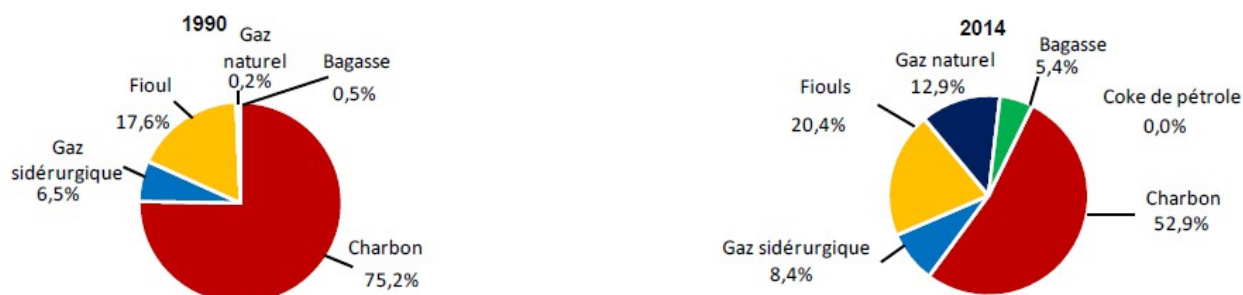
Les bilans établis par RTE⁷ montrent une tendance à la diminution des émissions de GES dues à la production d'électricité (hors autoconsommation comptabilisée par ailleurs). Cette évolution est notamment due aux combustibles utilisés⁸.

Évolution depuis 2008 des émissions de CO₂ sans prise en compte de l'autoconsommation

Millions tonnes



Evolution des émissions de CO₂ dues à la production électrique – source, bilans RTE http://www.rte-france.com/sites/default/files/2015_bilan_electrique.pdf.



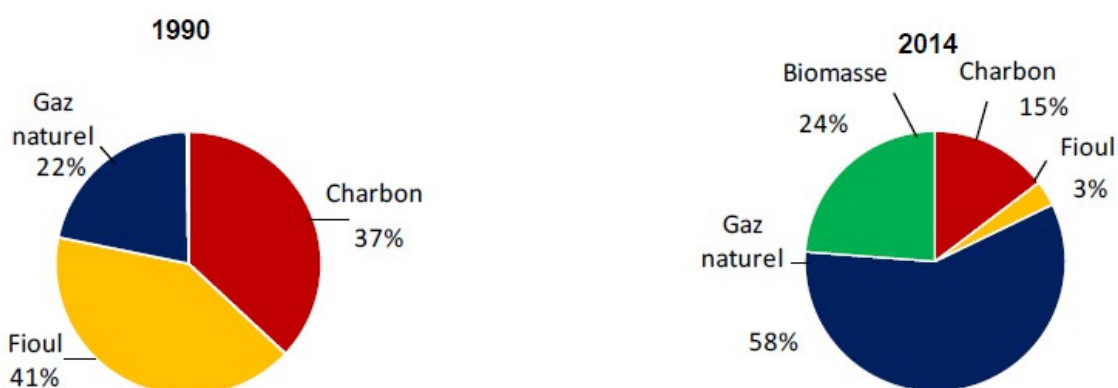
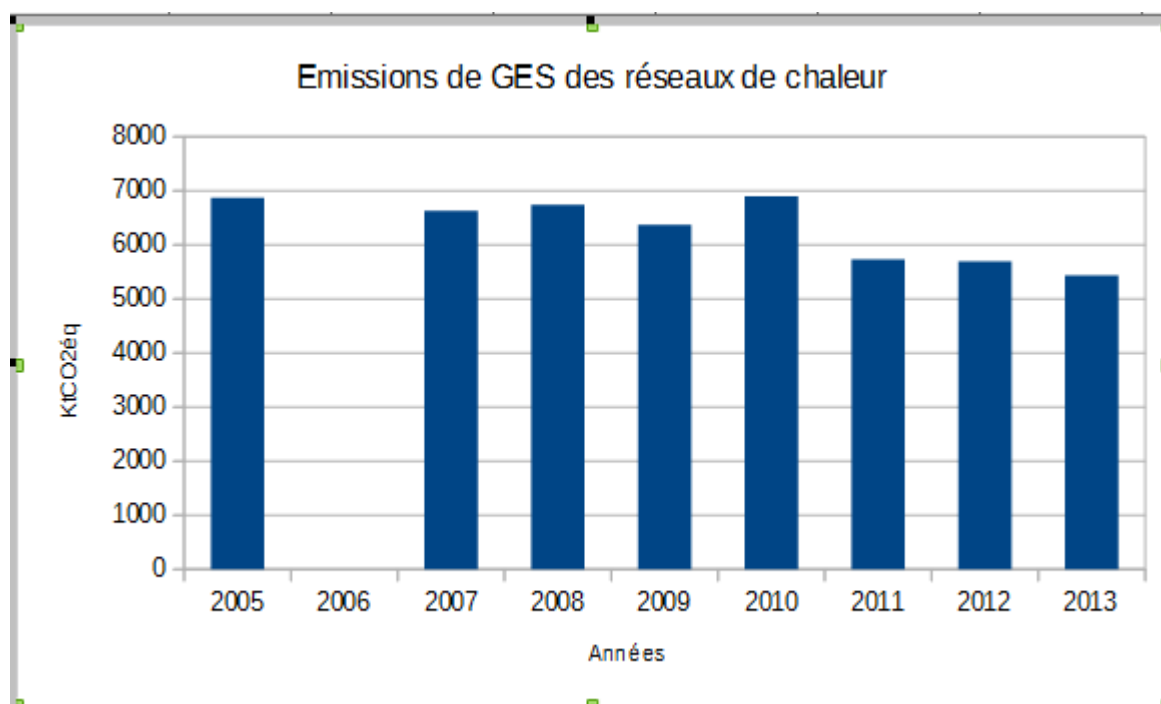
Distribution des combustibles pour la production d'énergie thermique (périmètre Kyoto) – Source, rapport national d'inventaire pour la France réalisé par le CITEPA en 2016

Les émissions des installations de chauffage urbain diminuent du fait du recours progressif à des combustibles moins émetteurs de GES. Les graphes suivants⁹ illustrent cette évolution. À ce jour, la production de chaleur correspondante n'a pas beaucoup évolué, passant de 22 594 GWh en 1990 à 24 920 GWh en 2014.

⁷ http://www.rte-france.com/sites/default/files/pictures/actu/rte_be_2015_interactif.pdf

⁸ Source : rapport national d'inventaire pour la France réalisé par le CITEPA en 2016

⁹ Source des valeurs des émissions : enquêtes nationales annuelles de branche. Source des évolutions des combustibles : rapport national d'inventaire pour la France, réalisé par le CITEPA en 2016



Evolution du « panier » de combustibles des installations de chauffage urbain (périmètre Kyoto) - Source, rapport national d'inventaire pour la France réalisé par le CITEPA en 2016

Les émissions du secteur du raffinage ont diminué depuis 1990, passant de 12,0 à 7,9 MtCO₂eq, essentiellement du fait d'une baisse de la production nationale de produits raffinés. La production était ainsi de 53 Mtep en 2014, à comparer à 70 Mtep en 1990. Rapportée à la tep raffinée, on note une légère amélioration de 0,17 MtCO₂eq/Mtep en 1990 à 0,15 MtCO₂eq/Mtep en 2014. Total vise ainsi une diminution de la consommation énergétique de ses installations de 1 % par an sur la période 2010-2020, et l'arrêt des brûlages de gaz en routine.

Les émissions dites fugitives ont diminué de 10,6 à 4,0 MtCO₂eq entre 1990 et 2014. Elles sont estimées par une méthode mise au point par GRDF. Elles représentent 0,1 % de la consommation. Ce chiffre mériterait d'être conforté. Des études en cours

aux États-Unis font état dans ce pays de taux nettement plus élevés, de l'ordre de 0,5 %. voir plus¹⁰.

1.2. L'utilisation de l'énergie représente les trois quarts des émissions nationales

Par contre, l'utilisation de l'énergie représente 74 % en 2013 (70,5 % en 2014¹¹) de ces émissions nationales, décomposées en 11 % (9,5%) pour les industries de l'énergie, 28 % (29%) pour les transports, 13 % (13 %) pour les industries manufacturières et la construction, 20 % (16 %) pour le résidentiel et le tertiaire, 3 % (3%) pour le reste dont agriculture, sylviculture et pêches.¹²

Il convient donc de distinguer les deux acceptions. On utilisera par la suite, en le mentionnant en cas de besoin, la première acception (ce qui se restreint aux processus de production et est cohérent avec les autres annexes thématiques pour éviter les doubles comptes) ou la seconde acception (avec doublons assumés, car la combustion est déjà traitée dans les parties sectorielles bâtiments, transports, etc.), qui implique donc d'envisager les relations avec les autres secteurs d'activité. À la différence du rapport de 2013, on considérera plutôt le secteur de l'énergie comme restreint au secteur de production d'énergie, sauf exceptions malgré tout nombreuses.

1.3. De très fortes ambitions de décarbonation du secteur

On pourrait croire que le secteur étant relativement décarboné, les efforts requis sont moindres que dans les autres secteurs. En fait, comme on le verra, si les objectifs nationaux à l'horizon 2030 sont quasiment dans la ligne d'un maintien des émissions par rapport à 2013, l'objectif à terme en 2050 est une décarbonation quasi complète du secteur. Elle est en effet technologiquement plus facilement envisageable que dans d'autres secteurs, dans la mesure où, aux émissions liées à l'énergie grise¹³ près, on sait produire de l'énergie non carbonée.

En outre, les possibilités de décarbonation des autres secteurs sont très liées aux types d'énergie que le secteur de production d'énergie produit. Les émissions du secteur des transports ne seront pas les mêmes selon que le secteur de la production d'énergie raffine des hydrocarbures ou produit des biocarburants de seconde génération ou du biogaz. C'est ce qui rend complexe l'étude de ce secteur et des scénarios explicités ci-après.

Un point majeur, transversal et donc mentionné ici à titre conservatoire, est aussi lié au potentiel -considérable- des économies d'énergies et de manière générale de la sobriété et de l'efficacité énergétique. Si les besoins énergétiques diminuent d'un facteur n , les émissions de GES correspondant à la production de cette énergie diminuent a priori dans les mêmes proportions. Ces points sont par ailleurs discutés de manière sectorielle.

¹⁰ Voir article de The Economist, faisant état d'un taux de 2,5 % selon une ONG <http://www.economist.com/news/business/21702493-natural-gas-reputation-cleaner-fuel-coal-and-oil-risks-being-sullied-methane>

¹¹ Source : CITEPA, émission de GES directs au format plan climat en France (périmètre Kyoto) Décembre 2015

¹² <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2369/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2016.html>

¹³ C'est-à-dire l'énergie nécessaire à la construction et à la déconstruction des unités de production

2. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios antérieurs à 2013

Les exercices de prospective et scénarisation en matière de production d'énergie sont variés et une typologie est difficile à dégager. En tout état de cause, la baisse des énergies fossiles et le développement des énergies renouvelables appartiennent à la plupart des scénarios décarbonés. La place du nucléaire, décarboné aussi, est par contre variable, certains scénarios misant dessus tandis que d'autres l'évacuent, avec éventuellement une transition reposant sur le gaz.

Le développement des énergies décarbonées renouvelables, souvent intermittentes, amène les questions de la stabilité du réseau, du stockage de l'énergie, et de l'autoconsommation.

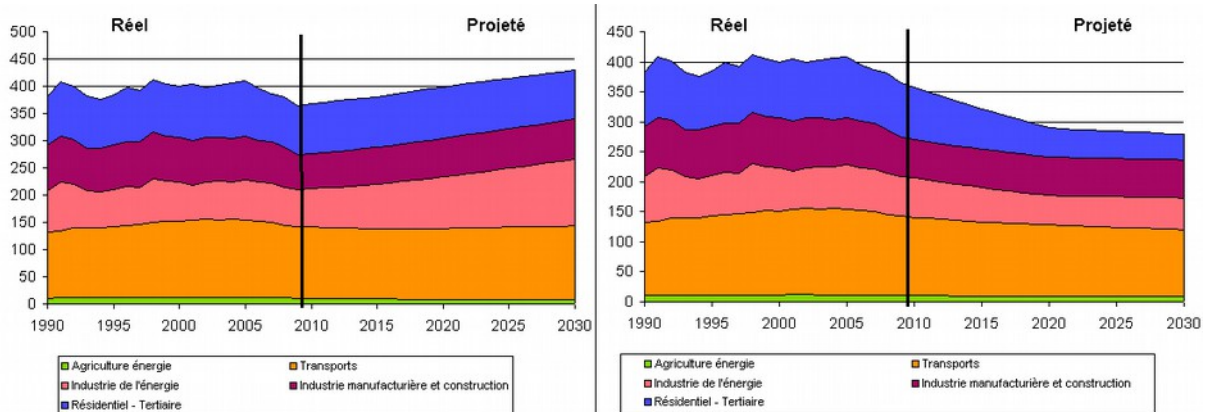
La présente section détaille des exercices de prospective, les programmations pluriannuelles et les scénarios pertinents.

2.1. Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030 de juillet 2011

La DGE a produit des « **Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030** » (juillet 2011)¹⁴ :

- un scénario tendanciel intégrant les effets escomptés des mesures effectivement prises en 2010 ;
- un second scénario prenant en compte l'atteinte des objectifs fixés à l'horizon 2020 et intégrant les mesures du « Grenelle ».

La synthèse de ces travaux fournit une représentation graphique des évolutions des émissions de gaz à effet de serre de la production d'énergie au regard des autres secteurs, dans le scénario Pré-Grenelle (à gauche) et dans le scénario Grenelle (à droite), en Mt CO₂ éq., qui laisse un champ important aux mesures encore à prendre pour améliorer la performance en 2030.



¹⁴ La synthèse de ces scénarios est téléchargeable http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/11-0362_5A_ET_note_synthese_sc_pros_v3.pdf.

Évolution des émissions de GES en tendanciel et avec mesures post-Grenelle – source, Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030, DGEC, 2011

Pour le secteur de la production d'énergie, les hypothèses retenues sont les suivantes :

Nucléaire : le réacteur EPR¹⁵ de Flamanville (+1,6 GW) a été pris en compte à horizon 2020 pour le scénario Pré-Grenelle, auxquels s'ajoutent l'EPR de Penly pour le scénario Grenelle; clairement ce scénario est optimiste.

Hydraulique : comme indiqué dans la PPI électricité 2009, il est supposé une augmentation de 3GW de la capacité d'ici 2020, suivie d'une stabilisation ; la PPE 2016 est en retrait de ces ambitions.

Renouvelables (éolien, photovoltaïque, biomasse) : à horizon 2020, les objectifs inscrits dans la PPI électricité 2009 ont été repris. Pour 2030, en l'absence d'autres données, les taux de croissance fournis par projections du Réseau de Transport de l'Électricité (RTE) ont été utilisés afin d'établir le parc de capacités renouvelables ; la PPE 2016 des énergies renouvelables est plus allante sur le photovoltaïque et moins sur l'éolien.

Les capacités thermiques à horizon 2030 et les capacités fioul à horizon 2020 sont établies par modélisation afin de répondre à la demande.

2.2. Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone octobre 2011 : vers une décarbonation presque totale du secteur de l'énergie, sous hypothèses encore fragiles

Selon ce rapport, dit encore rapport « Christian de Perthuis »¹⁶, la décarbonation du secteur de l'énergie regroupant la production électrique, le raffinage et le transport des hydrocarbures, la fourniture de vapeur et de chaleur peut être quasi totale en 2050 dans le cadre d'une forte accélération de l'efficacité énergétique, de la production d'énergies renouvelables (passant de 12 % à 40 %), et de centrales à gaz dont certaines pratiquant la capture et la séquestration du carbone. Le rapport suppose un croisement entre des coûts d'énergies renouvelables aujourd'hui élevés mais décroissants et des prix croissants des hydrocarbures, grevés d'un coût du carbone lui aussi croissant. Cependant l'hypothèse des prix croissants des hydrocarbures est prise en défaut depuis 2014, même si à terme on peut supposer une tendance haussière. Et la capture et séquestration du carbone se heurte à des obstacles techniques et économiques.

2.3. Rapport Énergie 2050 – février 2012 : pour une prolongation des centrales nucléaires

Le rapport « Énergie 2050 »¹⁷ rédigé à la demande du ministre chargé de l'industrie, de l'énergie et de l'économie numérique par Jacques Percebois et Claude Mandil (février 2012) examine les options relatives au nucléaire (prolongation, nouvelle génération, réduction voire sortie). Le rapport insiste sur l'importance de la sobriété et de l'efficacité

¹⁵ « European pressurized reactor », puis « evolutionary power reactor »

¹⁶ <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/114000655/index.shtml>

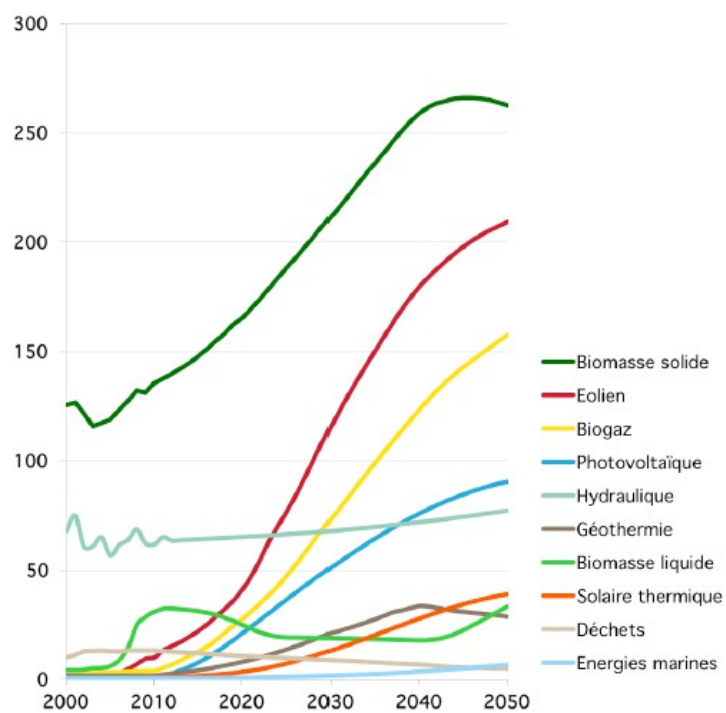
¹⁷ <http://archives.strategie.gouv.fr/cas/content/rapport-energies-2050.html>

énergétique (et aussi de vérité sur les prix de l'énergie, donc de hausse des prix), ainsi que sur la nécessité, pour toute décision, d'avoir une approche globale intégrant non seulement les tCO₂eq évitées mais aussi le coût, l'impact sur l'emploi et la balance économique, etc. Sur la question du mix énergétique, selon ce rapport, « *personne ne peut prédire ce que sera le paysage énergétique en 2050* ». Il plaide donc pour que la France ne se prive d'aucun moyen et donc s'inscrit contre un objectif de part du nucléaire à quelque horizon que ce soit (pour mémoire la LTECV du 17 août 2015 fixe un plafond de 50 % à la part du nucléaire dans la production d'électricité en 2025). Posant comme hypothèse qu'une centrale nucléaire est sûre si et seulement si elle est déclarée comme telle par l'autorité de sûreté nucléaire (ASN), il évite le débat sociétal et politique autour de cette source d'énergie, et considère comme un moindre mal la prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires existantes. Il encourage enfin la recherche en matière de stockage de l'énergie et d'énergies renouvelables, avec parmi les objectifs la conquête de marchés à l'export.

2.4. Scénario négaWatt – septembre 2011, actualisé en juillet 2013 : sobriété, efficacité, sortie du nucléaire et explosion des renouvelables

Le scénario négaWatt de 2011, actualisé en 2013, postule une démarche d'abord de sobriété, puis d'efficacité pour les besoins résiduels et enfin, pour répondre à la demande résiduelle, recourt aux énergies renouvelables : triplement de l'utilisation de la biomasse à l'horizon 2050, « *ratrapage du retard pris par la France dans le domaine de l'éolien terrestre, avec une multiplication par 3 de la puissance installée d'ici 2020 puis encore par 2,5 avant 2050* », croissance progressive du photovoltaïque pour à terme atteindre 90 TWh de production... soit en 2050 383 TWh issus d'énergies renouvelables électriques. Pour la production de chaleur la géothermie est mise à contribution (29 TWh en 2050 contre 1 TWh aujourd'hui), l'incinération des ordures baisse de 13 à 5 TWh grâce au tri et à la valorisation, le solaire thermique inexistant aujourd'hui atteint 120 M m² en 2050 soit 39 TWh de chaleur primaire. Au total, en 2050, 900 TWh d'énergies renouvelables sont disponibles face à un besoin de 1010 TWh en énergie primaire.

■ Développement des différentes filières renouvelables
dans le scénario négaWatt (en TWh)



Source : scénario NégaWatt de 2011 actualisé en 2013

3. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios postérieurs à 2013

Depuis le rapport de 2013, les circonstances ont notablement évolué. Les prix du pétrole se sont effondrés en 2014. Les scénarios ont été consolidés et ont alimenté l'élaboration de politiques et stratégies nouvelles, elles-mêmes cohérentes avec les orientations européennes et internationales. Ces évolutions récentes sont exposées chronologiquement *infra*.

3.1. Vision 2030-2050 de l'ADEME – juin 2013 : un exercice basé sur la sobriété énergétique, les renouvelables et à géométrie variable sur le nucléaire

La « contribution de l'ADEME à l'élaboration des scénarios énergétiques 2030-2050 »¹⁸, élaborée en 2012 et publiée en juin 2013, postule, dans le domaine de la production énergétique, un fort accroissement des énergies renouvelables. Cet exercice de prospective de l'ADEME se décompose en : un scénario « *ambitieux et réaliste d'évolution de la consommation énergétique et de la production d'énergies renouvelables* » pour 2030 avec comme indicateurs principaux la consommation énergétique et les émissions de CO₂ (avec -40 % en 2030 par rapport à 1990) ; et un exercice normatif de vision pour 2050 compatible avec le Facteur 4. Il cumule donc une perspective tendancielle volontariste pour 2030, et un exercice de « rétrodiction » (« *backcasting* ») pour 2050.

Il est plus centré sur la consommation que sur la production. Il envisage une décroissance de la consommation, passant de 151 Mtep en 2010¹⁹ à 123 Mtep en 2030 et 82 Mtep en 2050.

À l'horizon 2030²⁰, la production d'énergie renouvelable est mobilisée, notamment un triplement des combustibles solides biosourcés (18 Mtep) par rapport à 2010 (5,9 Mtep), une mobilisation de 34 GW d'éolien terrestre (à comparer aux 21,8-23,3 GW prévus par la PPE en 2023) et 12 GW d'éolien en mer (3 GW en 2023 selon la PPE), un gisement exploité de 33 GW de solaire photovoltaïque (18,2-20,2 GW en 2023 selon la PPE), un accroissement de l'hydroélectricité (stations de transfert d'énergie par pompage ou STEP) qui passerait de 5,5 GW à 7 GW. Ainsi en 2030 les sources de production primaires sont les suivantes :

¹⁸ <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

¹⁹ Il s'agit de la consommation énergétique. En Mtep corrigée des variations saisonnières les chiffres clefs de l'énergie (édition 2015) l'évalue à 152,6 Mtep, auxquels il faut ajouter 14,2 Mtep de consommations non énergétiques pour arriver à un total de consommation de 166,9 Mtep.

²⁰ À l'horizon 2030, pour la biomasse, « *L'hypothèse est faite d'un plan de mobilisation ambitieux de la ressource forestière permettant de passer d'un taux de prélèvement sur l'accroissement naturel de la forêt de 48 % aujourd'hui à un taux de 75 % en 2030.* » avec un gisement de 18 Mtep de biomasse combustion et 6 Mtep primaires de biomasse méthanisation en 2030. « *Le gisement mobilisable pour l'éolien terrestre à l'horizon 2030 est de 34 GW (le même niveau qu'en Allemagne aujourd'hui et un rythme d'installation d'1,5 GW par an). En mer, le gisement mobilisable est de 12 GW en 2030.* ». Pour le Photovoltaïque (PV), « *Le gisement mobilisable pour le PV est de 33 GW en 2030, soit un rythme d'installation moyen de 1,55 GW par an. Les centrales au sol sont uniquement exploitées sur des lieux sans conflit d'usage.* ». Pour l'Hydroélectricité, « *Le potentiel de croissance de l'hydroélectricité est aujourd'hui relativement limité. A 2030, le potentiel de stockage d'énergie électrique par STEP (Stations de Transfert d'Énergie par pompage) passerait de 5,5 GW à 7 GW.* ».

	Vecteurs	2030
Energie renouvelable (EnR)	Combustibles solides biosourcés	16
	Eolien	8,6
	Biogaz	5,8
	Géothermie	3,5
	Hydroélectricité	4,1
	PV	3,4
	Matière biocarburants hors bois	7,9
	Calories air	1,8
	Solaire thermique	1,0
	Déchets	1,4
	Energie marines	0,4
Total EnR		54
Non renouvelable	Nucléaire	56,1
	Gaz naturel	23,7
	Pétrole	42,2
	Charbon	5,1
	Déchets	1,4
Total général		182

SOURCES ÉNERGÉTIQUES PRIMAIRES 2030, EN MTEP

Source : contribution de l'ADEME à l'élaboration des scénarios énergétiques 2030-2050 – synthèse

Cela se traduit par des émissions de GES de 20 Mt CO₂ eq en 2030 contre 68,8 Mt CO₂ eq en 1990 pour le secteur de la production d'énergie.

En 2050²¹, trois scénarios de mix électrique sont élaborés, avec une part du nucléaire de respectivement 50 %, 25 % et 18 %, ce qui explique les fourchettes présentées dans le tableau *infra*. En 2050, le gisement de biomasse combustion est de 21 Mtep en maintenant un taux de prélèvement sur l'accroissement naturel de 75 %, la méthanisation livre 9 Mtep, le potentiel de l'éolien terrestre est porté à 40 GW, celui de l'éolien en mer à 30 GW, celui du photovoltaïque à 65 GW. En hydroélectricité une STEP marine est construite.

²¹ Pour la biomasse, « Avec une hypothèse de maintien du taux de prélèvement sur l'accroissement naturel de 75%, le gisement total accessible pour la biomasse combustion à l'horizon 2050 est de 21 Mtep. Concernant la méthanisation, le gisement accessible peut être porté, en cohérence avec le scénario agricole, à 9 Mtep en 2050 en énergie primaire. ». pour l'éolien, « Le potentiel mobilisable pour l'éolien terrestre est de 40 GW en 2050. En mer, le potentiel mobilisable est de 30 GW. ». Pour le Photovoltaïque (PV), « Le potentiel mobilisable pour le photovoltaïque est porté à 65 GW en 2050 ». Pour l'Hydroélectricité, « A l'horizon 2050, une STEP marine pourrait être construite. ».

Cela se traduit, dans le secteur de la production d'énergie, par une décroissance des émissions de 68,8 Mt CO₂ eq en 2010 à 3,1 Mt CO₂ eq en 2050, après un passage par 20 Mt CO₂ eq en 2030.

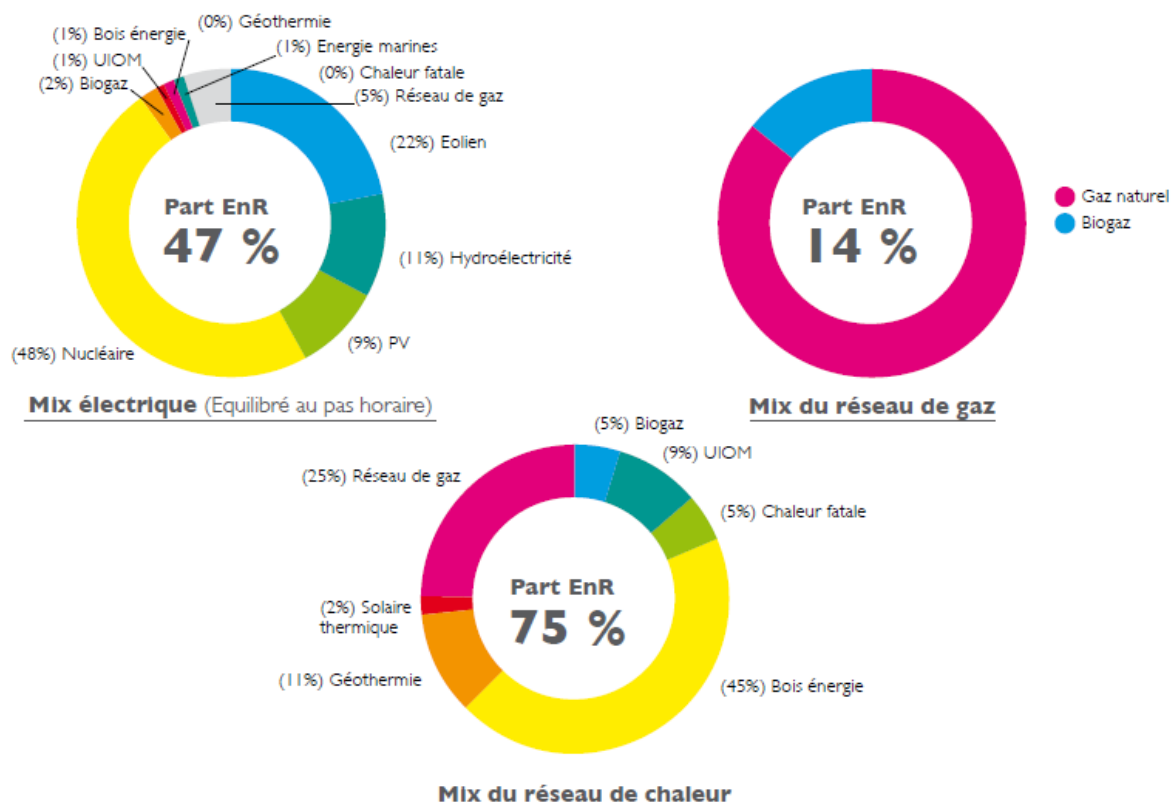
Cela se traduit par des émissions de GES de 3,1 Mt CO₂ éq en 2050 contre 20 Mt CO₂ éq en 2030 et 68,8 Mt CO₂ éq en 1990 pour le secteur de la production d'énergie. Il s'agit là d'un facteur 22 de réduction entre 1990 et 2050.

	Vecteurs	2050
EnR	Combustibles solides biosourcés	17,1
	Eolien	9,1 - 13,9
	Biogaz	8,8
	Géothermie	5,1 - 6
	Hydroélectricité	4,3 - 5,8
	PV	3,6 - 6
	Matière hors bois pour biocarburants	5,6
	Calories air	2,4
	Solaire thermique	1,8
	Déchets	1,3
	Energie marines	0,5 - 3,9
Non renouvelable	Nucléaire	21,6 - 57,6
	Gaz naturel	11,9
	Pétrole	5,9
	Charbon	4,0
	Déchets	1,4
Total général		117 - 140

SOURCES ÉNERGÉTIQUES PRIMAIRES 2050 , EN MTEP

Source : contribution de l'ADEME à l'élaboration des scénarios énergétiques 2030-2050 – synthèse, juin 2013

Et la part des différentes sources d'énergie sur le réseau est comme suit en 2030 :



.....

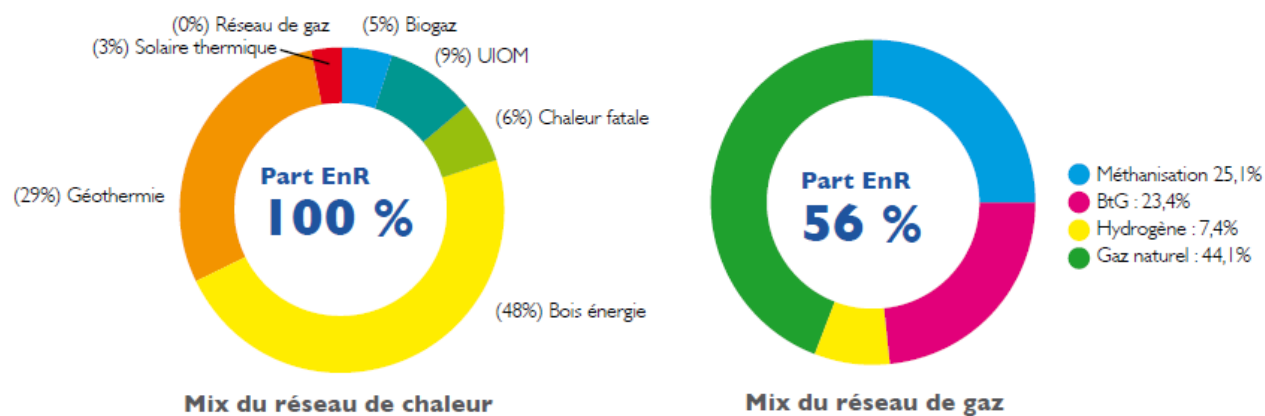
PART DES ENR SUR CHAQUE RÉSEAU EN 2030

Source : contribution de l'ADEME à l'élaboration des scénarios énergétiques 2030-2050 – synthèse, juin 2013

Et en 2050, l'on a la répartition suivante des différentes filières sur les réseaux électrique, gazier et de chaleur.

Source	ADEME 2050 – Production nationale					
	Nuc. Haut		Median		Nuc. bas	
	Part (%)	Mtep	Part (%)	Mtep	Part (%)	Mtep
Eolien	22,2%	9,1	30,0%	12,3	34,0%	13,9
Hydroélectricité	10,5%	4,3	14,0%	5,7	14,2%	5,8
PV	8,8%	3,6	14,7%	6,0	14,8%	6,1
Nucléaire	48,0%	19,6	25,0%	10,2	18,0%	7,4
Méthanisation	1,8%	0,7	1,8%	0,7	1,8%	0,7
UIOM	0,8%	0,3	0,8%	0,3	0,8%	0,3
Bois énergie	0,8%	0,3	0,8%	0,3	0,8%	0,3
Géothermie	0,3%	0,1	0,3%	0,1	0,5%	0,2
Energies marines	1,1%	0,5	7,0%	2,9	9,5%	3,9
Chaleur fatale	0,3%	0,1	0,3%	0,1	0,3%	0,1
Réseau de gaz	5,3%	2,2	5,3%	2,2	5,3%	2,2
Total	100%	40,9 Mtep	100%	40,9 Mtep	100%	40,9 Mtep

Mix électricité

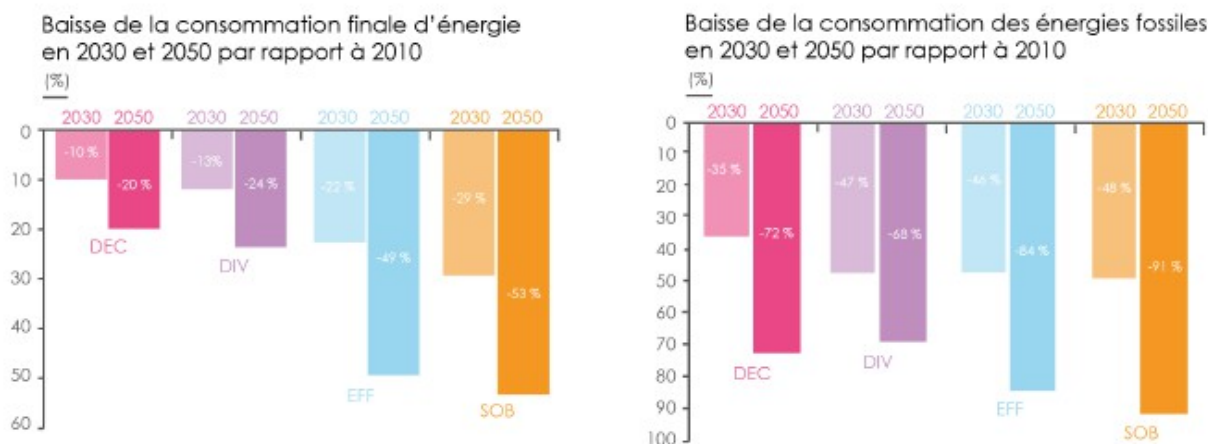


PART DES ENR SUR CHAQUE RÉSEAU EN 2050

Source : contribution de l'ADEME à l'élaboration des scénarios énergétiques 2030-2050 – document technique, juin 2013

3.2. Les trajectoires du DNTE – juillet 2013 : des trajectoires contrastées se rapprochant de la LTECV selon les objectifs en 2030 ou 2050

Les scénarios du DNTE²² de 2013 capitalisent sur divers exercices de modélisation et scénarisation antérieurs ou développés pour l'occasion, et présentent quatre trajectoires dites DEC (demande forte et DECarbonation par l'électricité), DIV (demande moyenne et DIVERsité des vecteurs), EFF (EFFicacité énergétique et diversification des vecteurs) et SOB (SOBriété énergétique et sortie du nucléaire). La trajectoire DEC est inspirée des scénarios Negatep, RTE Median, ANCRE ELE et UFE ; la trajectoire DIV est inspirée des scénarios ANCRE DIV, RTE nouveau mix, DGEAM AMO ; la trajectoire EFF est inspirée des scénarios ADEME, GRDF, ANCRE SOB et Encilowcarb, et est de fait la trajectoire la plus proche de la trajectoire officielle actuelle ; la trajectoire SOB est inspirée des scénarios négaWatt, Greenpeace, WWF et Global Chance. « Les 4 trajectoires envisagent une réduction très forte de la demande finale de produits pétroliers (de l'ordre de -80% à -90%). »



Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, pp. 128-131, février 2014

Comme la LTECV vise une réduction de 30 % de la consommation d'énergies fossiles en 2030 par rapport à 2012 et que cette consommation est passée de 132,5 Mtep en 2010 à 129,3 Mtep en 2012²³, cela revient à viser en 2030 une réduction de 32 % par rapport à 2010. De ce point de vue le scénario DEC est proche des stipulations de la LTECV.

La LTECV vise aussi une réduction de la consommation d'énergie finale de 50 % en 2050 par rapport à 2012, or les consommations d'énergie finale en 2010 et 2012 sont très proches (respectivement 166,7 Mtep et 167 Mtep). Dans ces conditions ce sont les scénarios EFF et SOB qui se rapprochent le plus de la trajectoire requise par la LTECV.

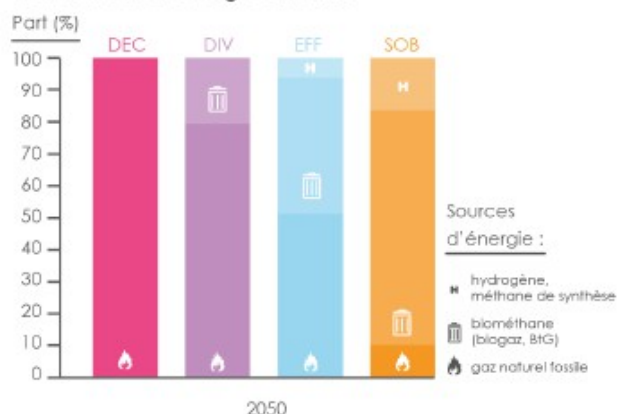
Les trajectoires étudiées visent toutes le facteur 4 au moins en matière d'émission de gaz à effet de serre. En pratique les émissions de CO₂ tous secteurs dues à l'énergie en 2050 vont de 35 MtCO₂ pour le scénario SOB à 110 MtCO₂ pour le scénario DIV, à comparer aux 386 MtCO₂ observés en 2010.

Pour la production d'énergie l'évolution vers 2050 est:

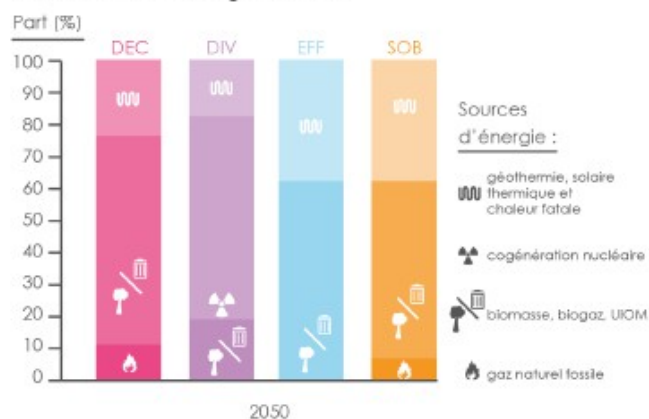
²² http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

²³ Cf chiffres clés de l'énergie édition 2014, CGDD, février 2015

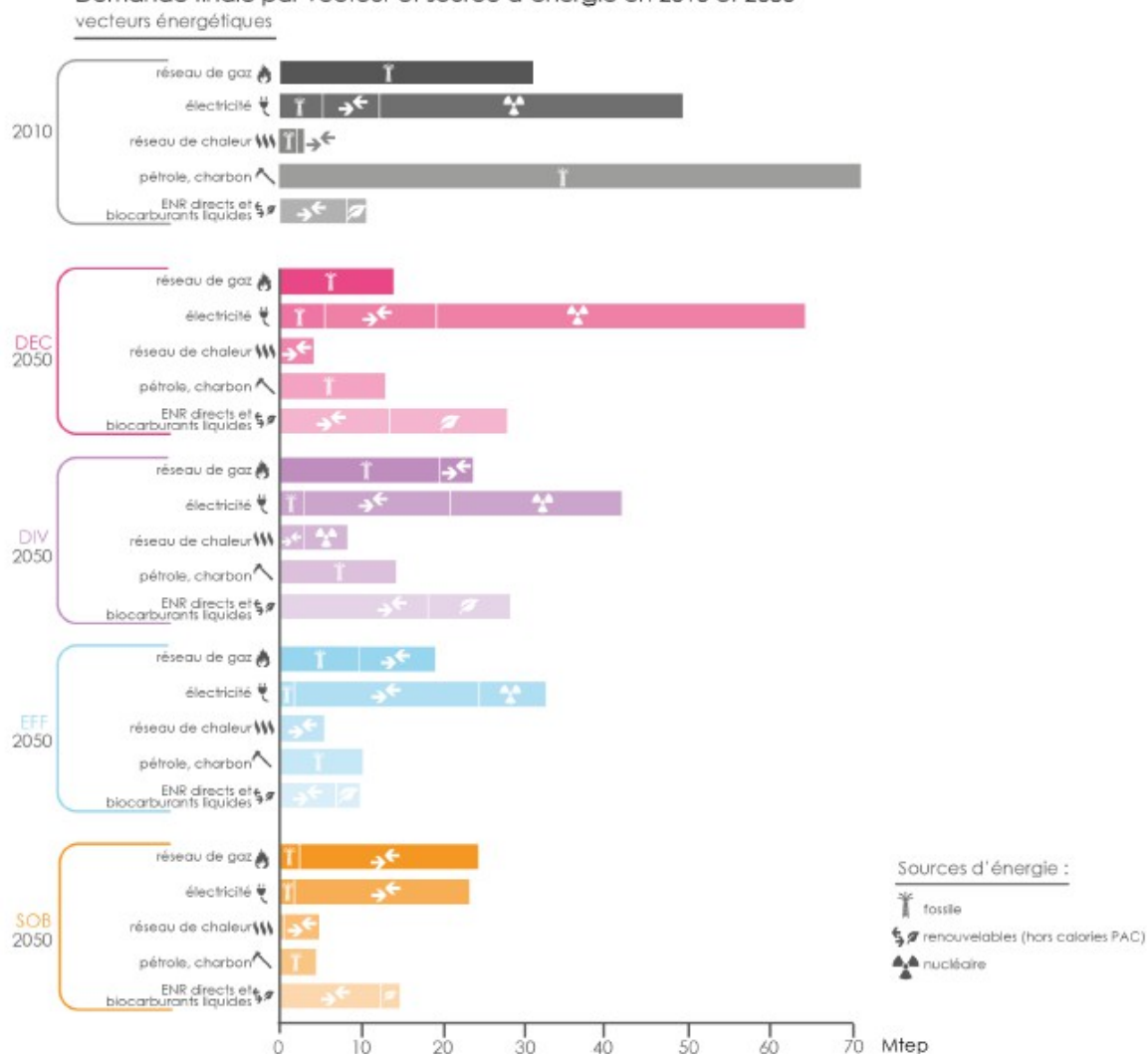
Réseaux de gaz : répartition des sources d'énergie en 2050



Chauffage urbain : répartition des sources d'énergie en 2050

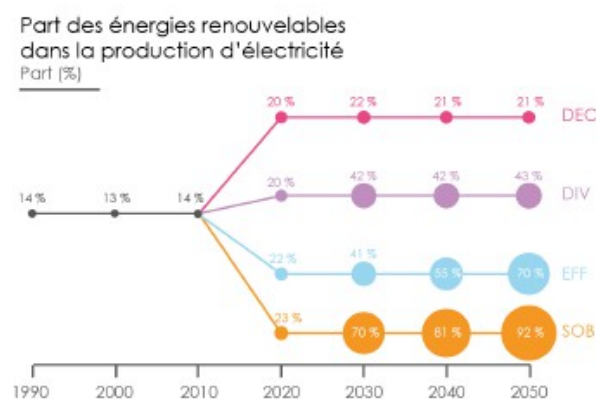
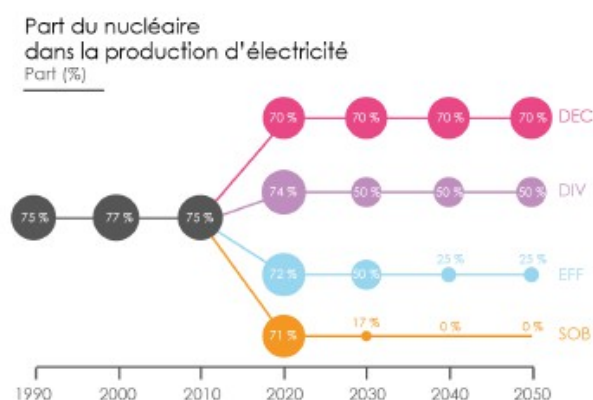
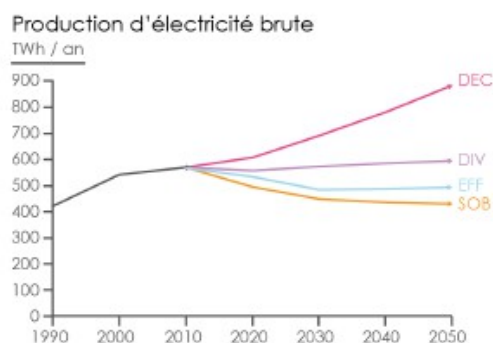


Demande finale par vecteur et source d'énergie en 2010 et 2050

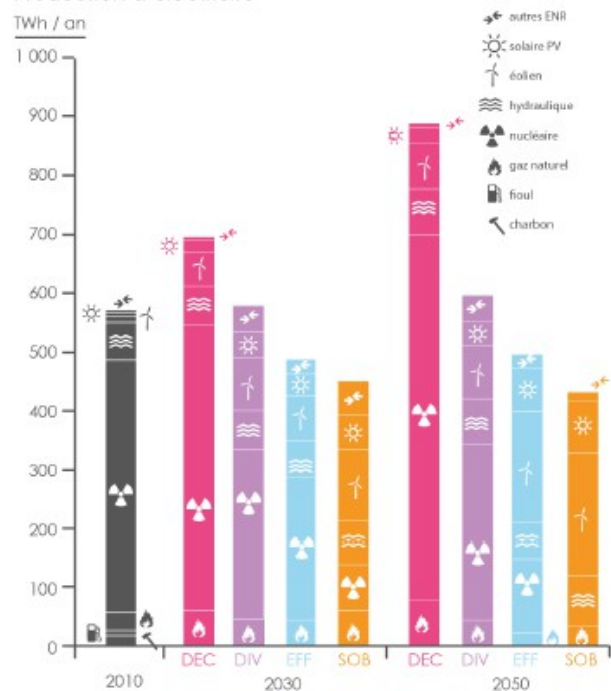


Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, pp. 128-131, février 2014

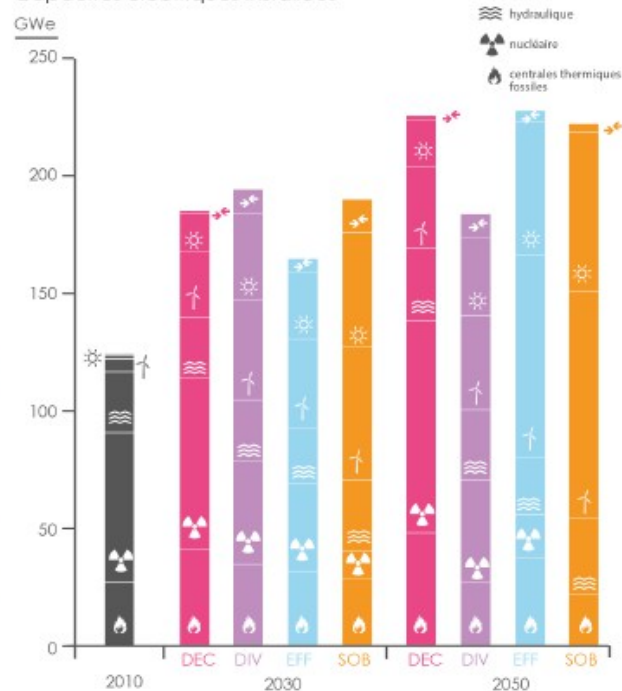
Pour la production d'électricité on a :



Production d'électricité



Capacités électriques installées

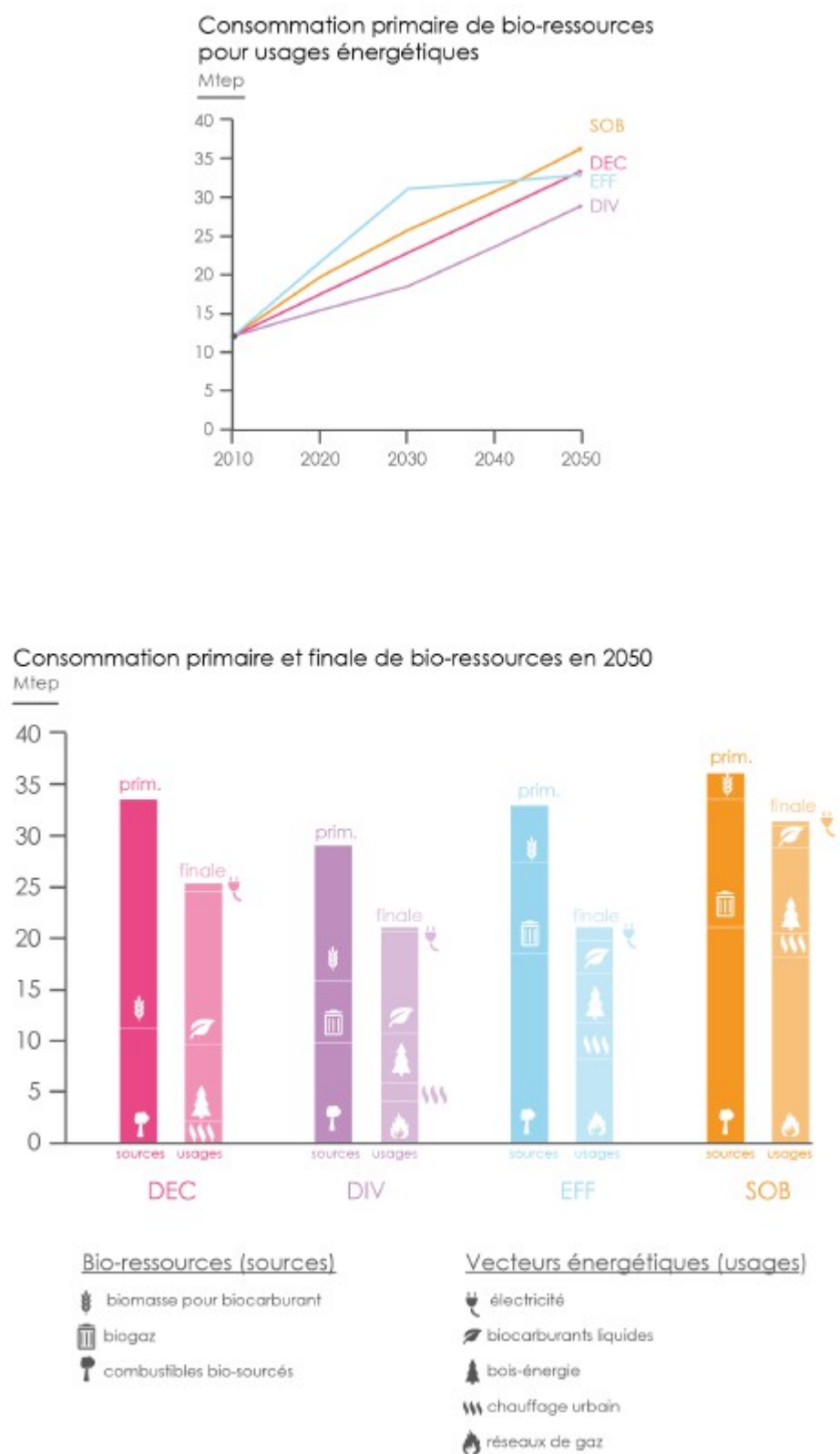


Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, pp. 128-131, février 2014

On observe ici des similitudes entre le scénario de la LTECV et le scénario DIV du point de vue de la part d'énergies renouvelables dans la production d'électricité à l'horizon 2030.

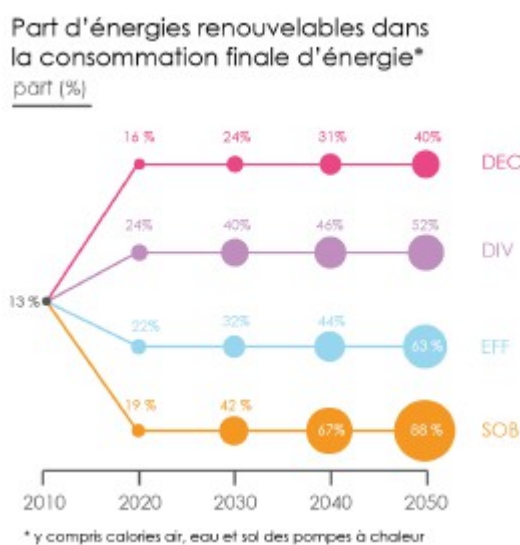
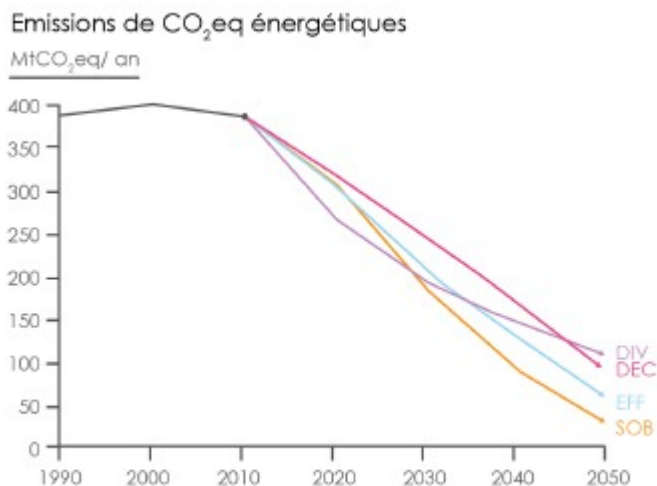
Ainsi, la LTECV s'apparente à DEC ou DIV en 2030, et SOB ou EFF en 2050.

Pour la biomasse on a :



Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, pp. 128-131, février 2014

Les impacts en matière d'émissions (pour l'énergie, tous secteurs) sont alors :



Source : *Étude des 4 trajectoires du DNTE*, pp. 128-131, février 2014

Par construction les quatre scénarios visent le facteur quatre en 2050 et l'atteignent peu ou prou. Sans surprise le scénario de sobriété est le plus efficace en la matière.

3.3. Le projet DPPP – septembre 2015 : quantifier les effets des mesures au cours du temps

Dans le sillage des travaux du DNTE, les travaux du **DDPP** (deep decarbonization pathway project)²⁴ s'attachent à quantifier les effets temporels de mesures diverses dans les scénarios d'émissions. Le travail est fait à l'échelle mondiale, mais propose sur la base des scénarios précités du DNTE une déclinaison pour la France²⁵. Incidemment est fait le constat d'une certaine similitude entre les orientations de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte en date du 7 août 2015 (LTECV) et le scénario de type EFF²⁶, en raison de l'objectif de division par deux de la

²⁴ <http://deepdecarbonization.org/countries/#france>

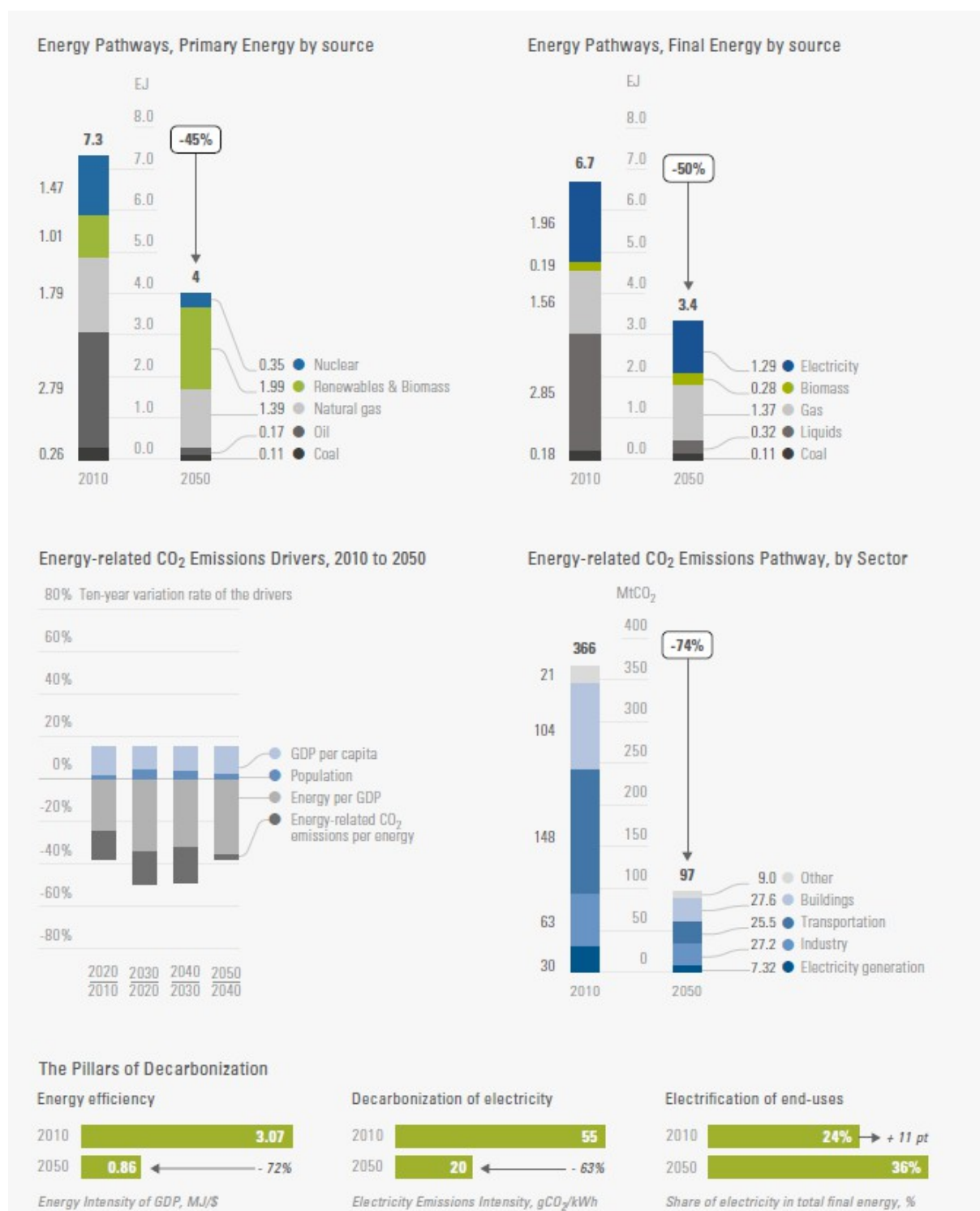
²⁵ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

²⁶ « La trajectoire EFF, inspirée des scénarios ADEME, GRDF, ANCRE Sob et Encilowcarb renforcé, prévoit une baisse de la demande énergétique importante et une diversification du mix énergétique. À

demande énergétique finale en 2050 par rapport à 2012 (LTECV) ou 2010 (trajectoire EFF). Cet objectif est ambitieux, et en cas d'échec sur ce point d'autres trajectoires doivent être considérées avec une moindre réduction de la consommation énergétique mais une plus grande part d'énergie décarbonée. Les travaux du DDPP étudient notamment la possibilité de réorienter la stratégie vers la trajectoire DIV (-20 % de réduction de demande énergétique en 2050 par rapport à 2010, 50 % d'électricité nucléaire après 2025, 40 % de renouvelables dans le mix électrique en 2050), qui elle-même repose notamment sur une nouvelle génération de centrales nucléaires. La conclusion est que la trajectoire EFF reste la plus robuste.

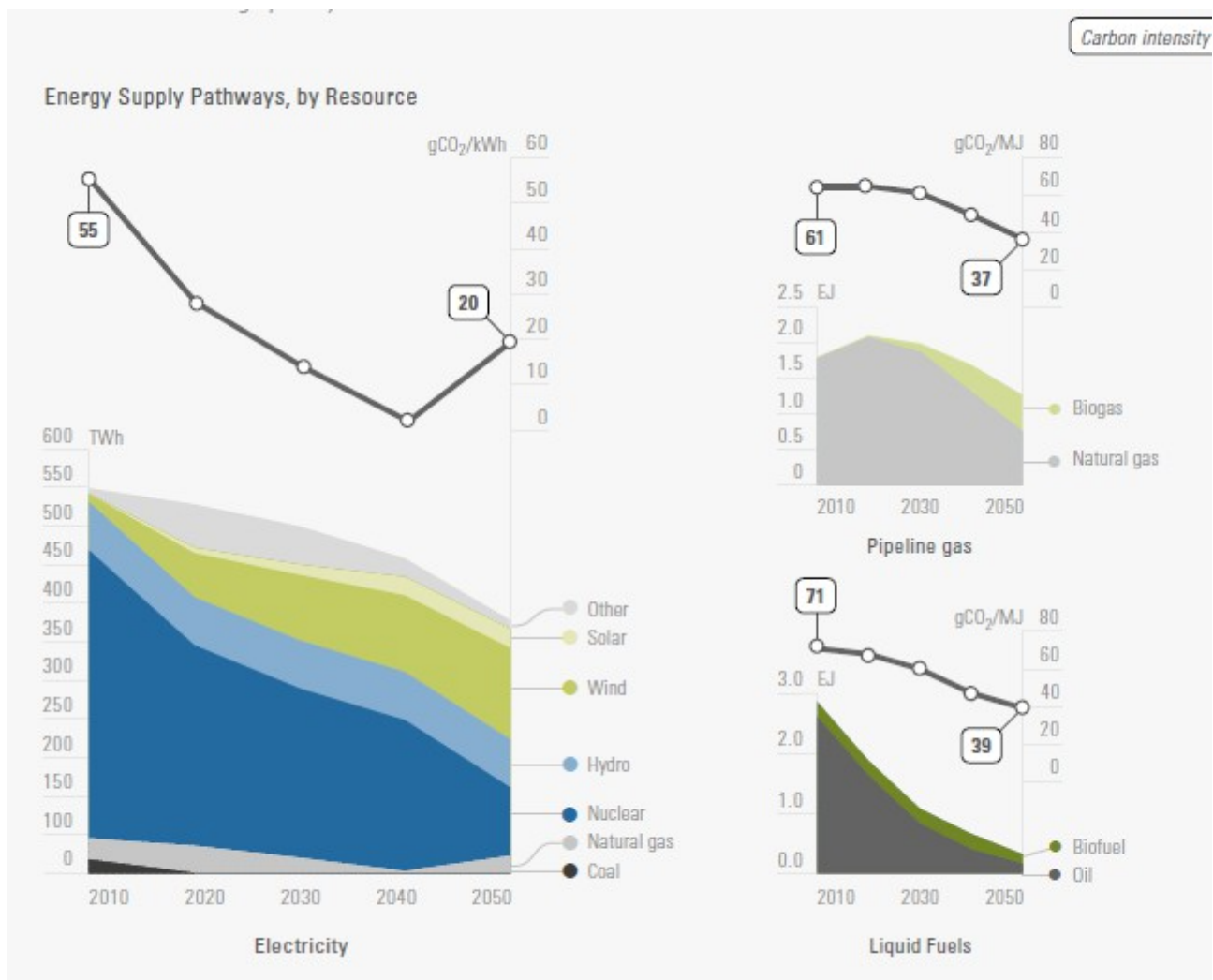
Le scénario d'efficacité EFF fait des hypothèses sur la croissance du PIB, la population, l'intensité énergétique du PIB et les émissions rapportées à l'énergie, et présente les caractéristiques suivantes en termes de production d'énergie primaire et consommation d'énergie finale (en exaJoules, soit 10^{18} J ou encore environ 25 MTep) :

horizon 2030, la trajectoire EFF vise à tirer, de manière ambitieuse mais réaliste, le potentiel maximum des économies d'énergie et des énergies renouvelables. », selon le document « Étude des 4 trajectoires du DNTÉ », http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf



Source : Pathways to deep decarbonization in France, SDSN-IDDRI, 2015

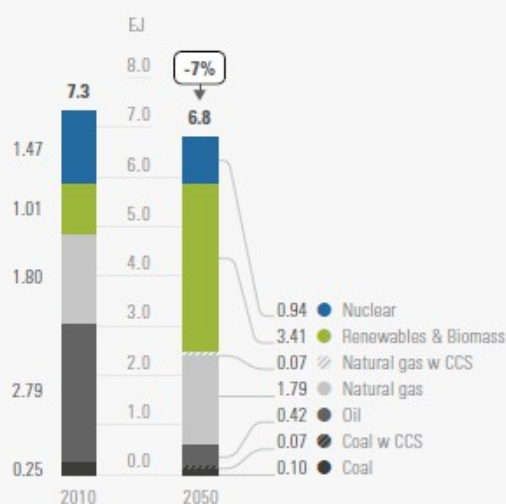
La trajectoire énergétique et d'émissions du secteur de la production d'énergie est alors:



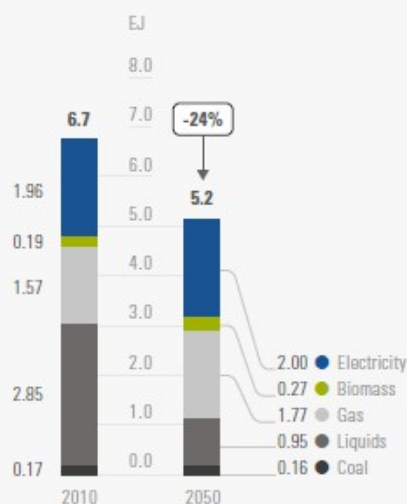
Source : *Pathways to deep decarbonization in France*, SDSN-IDDRI, 2015

Le scénario de diversité DIV, lui, présente les caractéristiques suivantes :

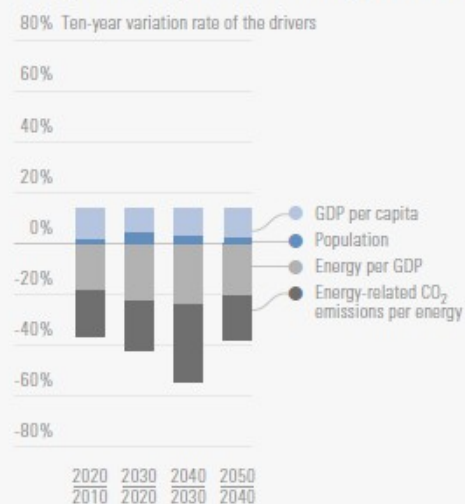
Energy Pathways, Primary Energy by source



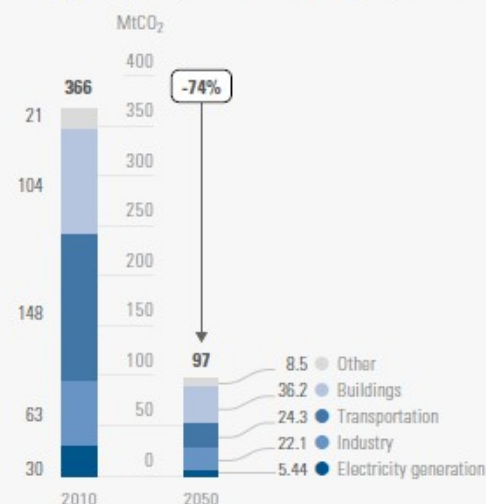
Energy Pathways, Final Energy by source



Energy-related CO₂ Emissions Drivers, 2010 to 2050



Energy-related CO₂ Emissions Pathway, by Sector



The Pillars of Decarbonization

Energy efficiency



Decarbonization of electricity

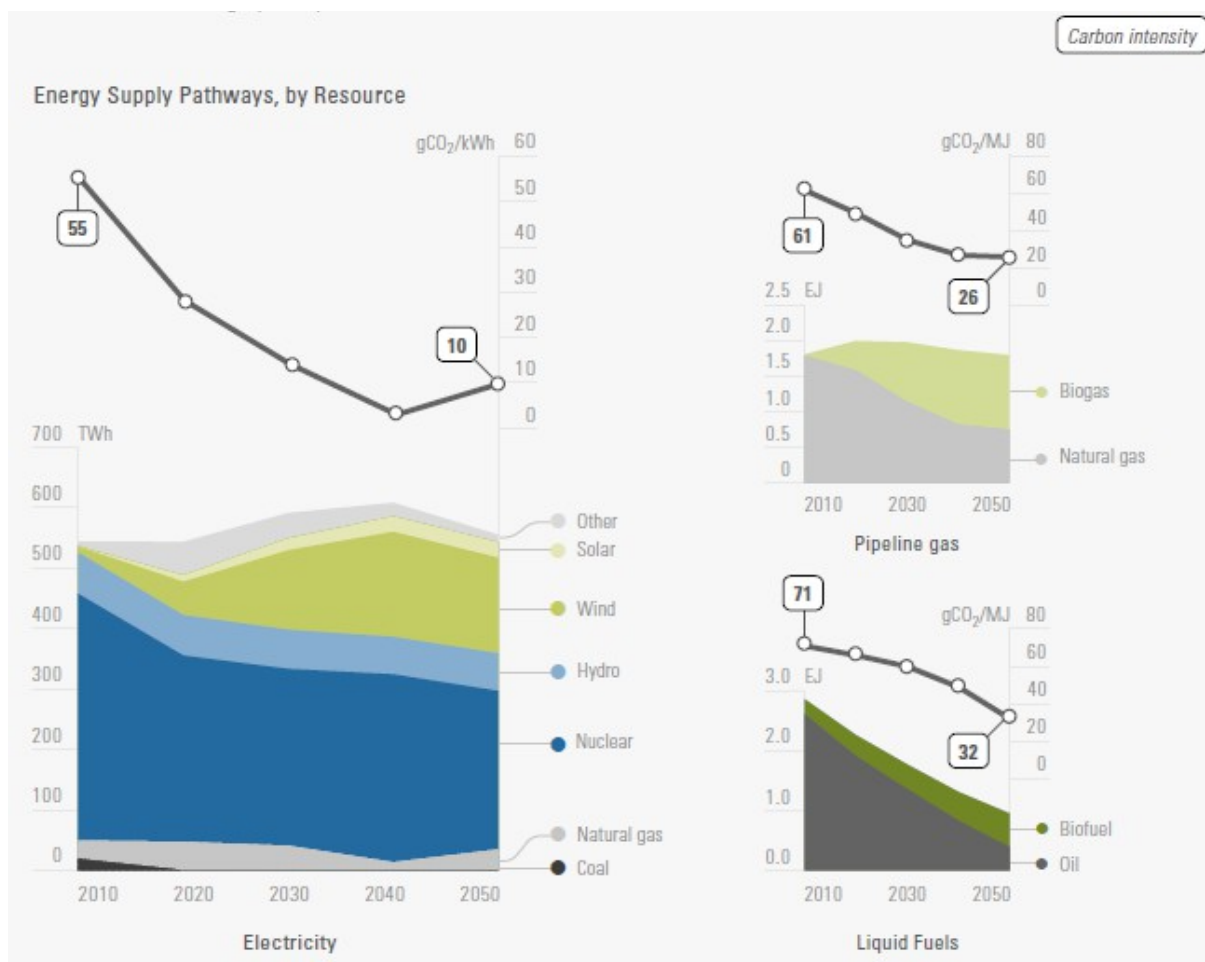


Electrification of end-uses



Source : Pathways to deep decarbonization in France, SDSN-IDDRI, 2015

La trajectoire énergétique et d'émissions du secteur de la production d'énergie dans le scénario de diversité DIV est alors:



Source : *Pathways to deep decarbonization in France*, SDSN-IDDRI, 2015

Il est intéressant de rappeler l'observation faite *supra* que la LTECV se rapproche sur certains points, à l'horizon 2050, des trajectoires EFF ou DIV que l'on vient de détailler, et en 2030 des trajectoires EFF et SOB, d'une certaine manière plus exigeantes, et en tout état de cause plus performantes en termes d'émissions de GES. Cela est évocateur d'un risque mentionné dans le rapport de 2013, qui est celui de reporter à plus tard les efforts.

3.4. L'étude de l'ADEME sur un mix 100 % énergies renouvelables en 2050 - octobre 2015 : un exercice technique extrême notamment bridé par les difficultés d'acceptation

L'étude de l'ADEME « un mix 100 % énergies renouvelables en 2050 ? Analyses et optimisations »²⁷ a été publiée en octobre 2015. Elle pousse encore plus loin l'objectif de la démarche précédente de l'ADEME (contribution de l'ADEME à l'élaboration des scénarios énergétiques 2030-2050, voir *supra*), déjà marquée par un fort recours aux énergies renouvelables, en examinant une configuration à 100 % d'énergies renouvelables, libres d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur fonctionnement (mais pas lors de leur élaboration dans une perspective d'analyse de cycle de vie). « Il s'agit d'une étude scientifique à caractère prospectif et exploratoire et non pas d'un scénario politique. Elle est relative à l'exploration technique du déploiement des EnR (énergies renouvelables) au sein du mix électrique: à l'instar des travaux du Laboratoire National pour les Énergies Renouvelables américain (NREL) de 2012

²⁷ <http://mixenr.ademe.fr/> et <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

étudiant un scénario 100% EnR aux USA. Les mix électriques envisagés restent en effet théoriques, puisqu'ils sont construits ex nihilo et ne prennent pas en compte la situation actuelle ni le scénario pour arriver au résultat. L'étude a pour but de mettre en lumière les freins ainsi que les mesures à mettre en œuvre pour accompagner une politique de croissance massive des EnR électriques. Elle vise également à identifier les limites au-delà desquelles la faisabilité technique serait impossible ou le coût pour la collectivité non supportable. Sur ces questions, les principaux résultats sont les suivants:

plusieurs mix électriques sont techniquement possibles pour satisfaire la demande chaque heure de l'année avec 80 ou 100% de renouvelables;

le développement de la maîtrise de la demande d'électricité, ainsi que la maîtrise de la pointe, sont des conditions essentielles: sans elles, quel que soit le mix intégrant notablement des EnR, le coût du système électrique n'est pas maîtrisé;

le coût des technologies doit continuer à baisser, surtout pour les technologies les moins matures, afin de permettre un mix équilibré entre les différentes filières de production d'électricité. Cette baisse de coût peut s'envisager grâce au progrès technologique, mais également via la mise en place de conditions de financement appropriées pour les énergies renouvelables;

l'acceptabilité sociale est cruciale pour permettre la réalisation d'un nouveau mix électrique sur le terrain, dans les meilleures conditions: complémentarité entre productions domestiques et productions centralisées, interconnexion renforcée par le réseau électrique, redistribution des revenus générés par la production d'énergie. »

Cette étude est un exercice qui a donné lieu à controverses. Il repose sur un usage très intensif de l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne. Cependant l'étude décline différentes possibilités selon le degré d'acceptabilité de l'éolien, qui est de fait un problème déjà rencontré sur le terrain. Les mix énergétiques correspondants sont les suivants :



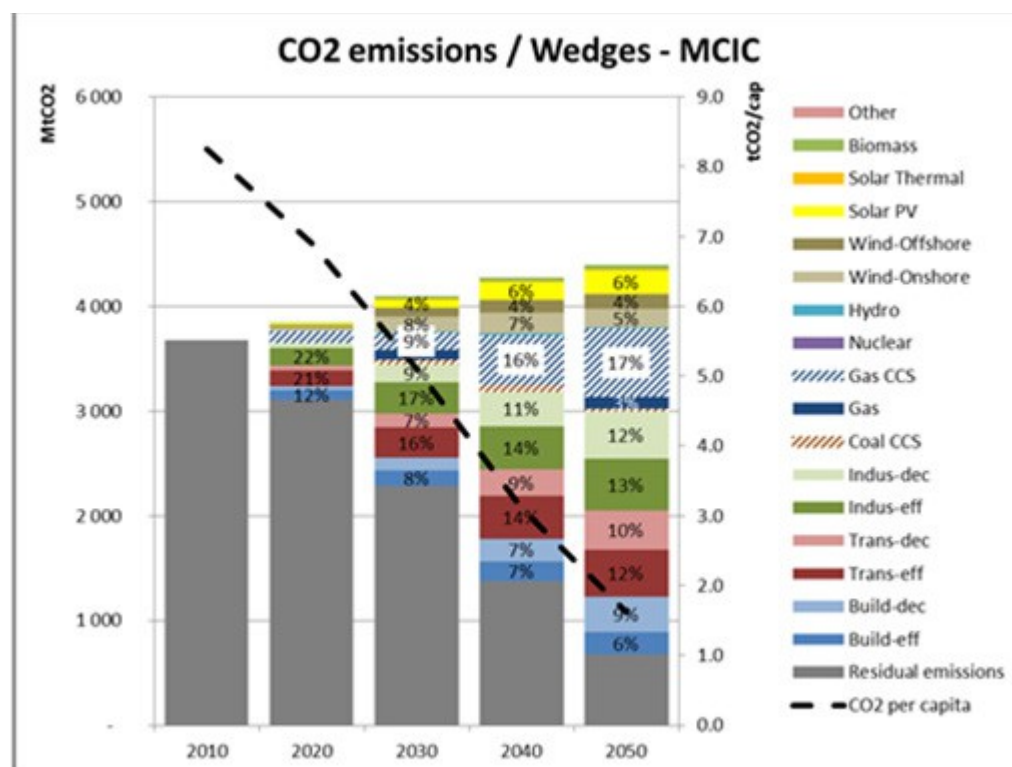
★ Figure 3 - Des mix électriques 100% EnR (colonne de gauche) ou 80% EnR (colonne de droite) adaptés aux différentes hypothèses retenues: histogramme des capacités installées (EnR, stockage et réseau) et camembert de répartition de la production annuelle (TWh) par macro-filière⁹.

Différents mix énergétiques de l'étude ADEME 100 % renouvelable-analyses-optimisations

Il reste clair que les capacités installées, même en cas de faible acceptabilité, sont considérables pour l'éolien (entre 150 et 330 GW) alors que pour mémoire la PPE 2016 pour les EnR envisage au maximum une trentaine de GW éoliens (surtout terrestre mais aussi en mer) à l'horizon 2023, et que la capacité installée en 2016 vient d'atteindre 10 GW.

3.5. Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, rapport 2013 – janvier 2014²⁸ et le rapport ANCRE sur les « decarbonization wedges » - novembre 2015

Les scénarios de l'ANCRE (alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie) ont alimenté les réflexions du DNTE. D'autres travaux recourent à l'approche des « coins de décarbonation » (*decarbonization wedges*) qui permettent de quantifier et visualiser graphiquement l'impact de mesures au fil du temps, à partir d'une situation initiale. L'étude est faite au niveau mondial. Le rapport le plus récent date de novembre 2015²⁹ et a été préparé à temps pour la COP21. L'approche se base sur les scénarios du DDPP. Par exemple pour un pays industrialisé mais moyennement carboné comme la France, l'on a des graphiques comme suit, présentant l'effet, au fil du temps, de différentes mesures (promotion des énergies renouvelables, efficacité, décarbonation...) dans différents secteurs (industrie, transports, bâtiment):



Évolution prévisionnelle de la distribution des réductions des émissions de GES dans un pays industrialisé moyennement carboné prenant des mesures de décarbonisation - Source : Decarbonization wedges report, novembre 2015, p. 13

L'on constate que de même qu'il n'existe pas une solution dominante en matière de production énergétique et qu'un mix énergétique équilibré est inévitable, de même il n'existe pas de mesure miracle pouvant réduire significativement à elle seule les émissions. La décarbonation et l'efficacité, déclinées secteur par secteur par secteur, contribuent chacune de manière significative mais faible en pourcentage à l'objectif global de décroissance des émissions. Le secteur de l'énergie contribue à un tiers des

²⁸ http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.asp?private_resource=984&fn=Doc+complet+ANCRE+version+finale+15+Janv_0.pdf

²⁹ http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

réductions à l'horizon 2050. La situation française est cependant différente, avec un secteur de production d'énergie relativement décarboné, et donc un potentiel d'amélioration moindre en termes d'émissions.

3.6. La Loi de transition énergétique pour la croissance verte, août 2015 : une démarche volontaire en préalable de la COP21 et en cohérence avec les orientations européennes

La **LTECV**³⁰, loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte, vise à développer les énergies renouvelables pour « *équilibrer nos énergies et valoriser les ressources de nos territoires* ». L'objectif, à partir de 14 % d'énergie consommée d'origine renouvelable en 2012, est de passer à 23 % en 2020 et 32 % en 2030. Diverses actions contribuent à cet objectif, comme la création du fonds d'épargne de 5 G€ à la Caisse de Dépôts et Consignations pour financer la transition énergétique, l'appel à projet pour 1 500 méthaniseurs en 3 ans, les appels d'offre pour les installations photovoltaïques « élargis et améliorés », le soutien aux énergies renouvelables électriques (vente sur le marché et prime), la modernisation de la gestion des centrales hydroélectriques, la simplification des procédures d'autorisation (expérimentation du permis unique), etc.

3.7. La stratégie nationale bas carbone : des budgets sectoriels jusqu'en 2028

La **SNBC**³¹ de novembre 2015 « *est instaurée par la loi n°2015-992 du 17 août 2015, relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV). Elle définit la marche à suivre pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre (GES). Elle fixe le cap pour la mise en œuvre de la transition vers une économie bas-carbone et durable* ». Elle propose jusqu'à 2028 des budgets carbone par grands secteurs d'activité. Son objectif global est le facteur 4 à l'horizon 2050.

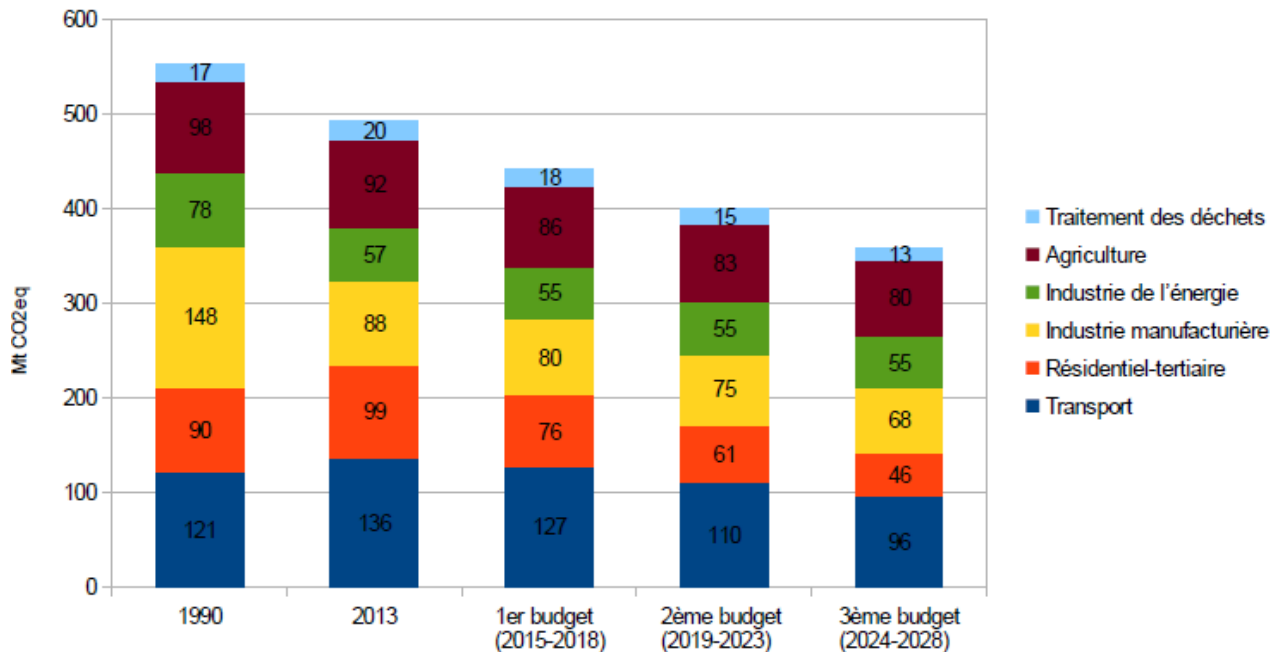
Cependant, pour les industries de l'énergie, la SNBC stabilise les budgets carbone à l'horizon 2030 -même si l'ambition à terme est de les réduire très considérablement à l'horizon 2050 (facteur 20 ou 25 entre 1990 et 2050). Dans la SNBC, les émissions des industries de l'énergie passent ainsi de 78 Mt CO₂ éq en 1990 et 57 Mt CO₂ éq en 2013 à des cibles annuelles de 55 Mt CO₂ éq sur les trois périodes 2015-2018, 2019-2023 et 2024-2028.

³⁰ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-3.pdf

³¹ www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>

et

Répartition sectorielle indicative



Répartition sectorielle indicative des budgets carbone – Source, SNBC

La raison de cet effort apparemment très modéré est a priori la forte décarbonation du secteur de production d'énergie, notamment électrique. Cependant, dans le sillage du rapport De Perthuis mentionné *supra*, l'ambition d'une décarbonation quasi totale (-96%) du secteur à l'horizon 2050 est maintenue, en dépit d'un effort minimal jusqu'à 2030.

L'argumentaire de la SNBC pour les « énergies bas carbone » est le suivant : « Les émissions dues à la production d'énergie représentent seulement 12 % des émissions de GES en France et 85 % de ces émissions relèvent du système communautaire d'échange de quotas d'émissions (SCEQE ou EU ETS). Entre 1990 et 2013, elles ont diminué de 27 %. D'ici 2050, les travaux du comité « trajectoire 2020-2050 vers une économie sobre en carbone » supposaient une réduction d'un facteur 20 par rapport à 1990, soit une décarbonation quasiment complète du secteur. Cela se traduit par :

- une accélération des gains d'efficacité énergétique (facteur 2 dans la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte) : baisse de l'intensité énergétique du PIB et enjeu de la maîtrise de la consommation des énergies carbonées, transferts d'usage vers l'électricité.

- une décarbonation radicale du mix énergétique à 2050 (facteur 10) : (baisse des gCO₂/kWh de l'électricité et des réseaux de chaleur). L'ambition de ces scénarios se fonde sur une hypothèse de déploiement important de la capture et du stockage de carbone (CCS) à 2050. Si ce n'est pas le cas, alors les efforts de décarbonation de la production d'énergie devront être reportés sur d'autres options, y compris sur d'autres secteurs de l'économie.

Dans le secteur de la production d'électricité, il s'agit en particulier:

· *D'éviter au maximum les investissements dans de nouveaux moyens thermiques à combustible fossile. Les PPE devront piloter de manière précise le besoin de nouveaux moyens thermiques en fonction des orientations prises sur les autres filières, des objectifs de sécurité d'approvisionnement et du besoin de flexibilité du système électrique, dans le respect des budgets carbone et des objectifs de décarbonation du système électrique à long terme.*

· *De réduire les émissions des installations existantes grâce à un prix du carbone suffisamment élevé.*

· *De prévoir la possibilité du déploiement de systèmes de capture et stockage ou utilisation du carbone pour les centrales fossiles qui auront vocation à fonctionner à l'horizon 2050 (au besoin en retro-fit), en tenant notamment compte des possibilités de stockage dans les choix de localisation des installations.*

· *D'améliorer la flexibilité du système sans augmenter les émissions : l'intégration des EnR va nécessiter à terme un besoin accru de flexibilité. Cela nécessite notamment :*

o *De développer la capacité de flexibilité de la filière hydraulique, car cette filière EnR permet une importante production de pointe ;*

o *De développer les réseaux intelligents et le stockage adaptés aux besoins : stockage hebdomadaire pour faire face à l'intermittence de l'éolien à l'horizon 2030, stockage journalier pour gérer la production photovoltaïque après 2030 lorsqu'elle atteindra des niveaux significatifs ;*

o *De développer les transferts entre systèmes énergétiques (power-to-gas, power-to-heat) ;*

o *De développer les interconnexions avec nos pays voisins pour maximiser le foisonnement de production des énergies renouvelables.*

Dans le secteur de la production de chaleur, il s'agit en particulier d'orienter la production vers la chaleur renouvelable et la récupération de chaleur et de développer les réseaux de chaleur urbains, afin de permettre un recours accru aux énergies renouvelables et de récupération par le chauffage. »

En résumé donc, la trajectoire bénéficie par construction de la réduction de moitié de la consommation énergétique finale en 2050 par rapport à 2012 (167 Mtep en 2012 ; pour mémoire c'était 153,1 Mtep en 1990 ; cela correspond donc à une réduction de 45,5 % en 2050 par rapport à 1990, point de référence usuel). Cette réduction de moitié de la consommation est atteinte par efficacité énergétique, électrification des usages, gestion intelligente de la demande. L'objectif final étant de réduire d'un facteur 20 à 25 les émissions du secteur en 2050 par rapport à 1990, la stratégie propose aussi d'accélérer les gains d'efficacité énergétique (facteur 2 au final) et de décarboner le mix énergétique en 2050 d'un facteur 10. Cela passe par la décarbonation résiduelle de la production électrique, le développement des EnR, et du stockage d'énergie y afférent (hebdomadaire pour l'éolien, journalier pour le photovoltaïque) en métropole, le développement des EnR non intermittentes (géothermie, biomasse) dans les zones non interconnectées, la décarbonation de la production de chaleur et de froid (multiplication par cinq en 2030 par rapport à 2012), etc. Un déploiement « important » de la capture et stockage du carbone est aussi une composante de la stratégie. Par ailleurs la SNBC évoque de manière embryonnaire des évolutions comme l'autoproduction ou l'autoconsommation

L'objectif numérique de réduction en 2050 de la SNBC est, ainsi, assez semblable à celui de la vision prospective de l'ADEME en 2030-2050.

Il peut être intéressant de noter que si l'on cumule la décarbonation complète de la production d'énergie à l'horizon 2050 (grosso modo passage de 80 MtCO₂ éq à 3 MtCO₂ éq) avec une division d'un facteur 2,5 des émissions agricoles (grosso modo passage de 100 à 40 Mt CO₂ éq ce qui est jugé maximal par les scénarios dévolus à ce dernier secteur) alors on atteint grosso modo le facteur 4 pour le groupement sectoriel « production d'énergie » plus « agriculture » puisque l'on passe de 180 à 43 MtCO₂ éq. Cette coïncidence préserve pour les secteurs restants (transports, bâtiment et industrie) la possibilité de se tenir à un objectif de facteur 4 afin que l'objectif global soit atteint.

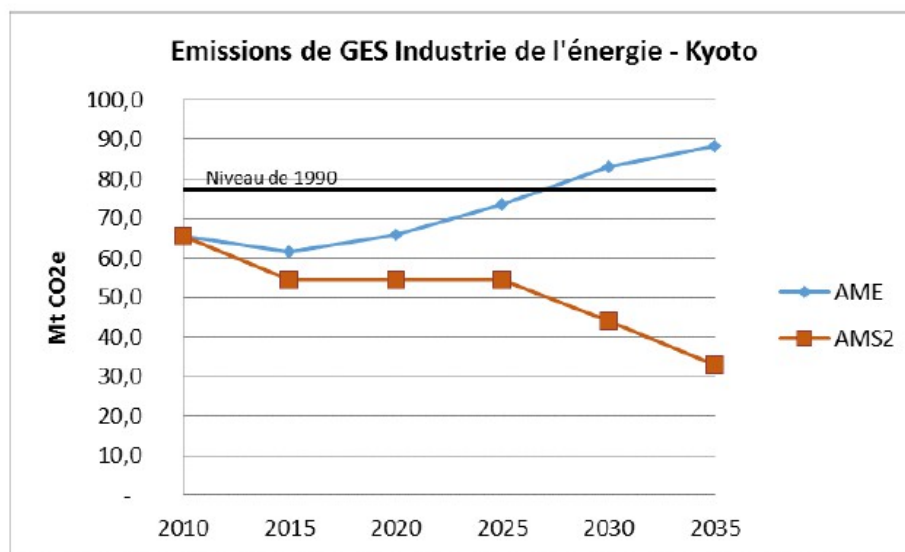
3.8. Les scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035

Le rapport « **Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035** »³² commandité par la DGEC et remis en septembre 2015 fournit une synthèse des résultats de l'exercice de modélisation pour la construction des scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air à l'horizon 2035. Deux scénarios principaux ont été construits et analysés : un scénario « AME » « avec mesures existantes » au 1^{er} janvier 2014, et un scénario « avec mesures supplémentaires » appelé « AMS2 » incluant la mise en œuvre effective de toutes les mesures prévues dans l'AME ainsi que celles adoptées ou annoncées après le 1^{er} janvier 2014, dont en particulier les mesures et objectifs prévus par la LTECV : -40% des émissions de GES en 2030 par rapport à 1990, 32% la part des énergies renouvelables en 2030, etc. Les données sont présentées sous format conforme au rapportage du protocole de Kyoto, avec par exemple des catégories séparant les émissions dues à la combustion des autres. Outre la France métropolitaine, les DOM sont inclus.

Pour le périmètre de la production d'énergie (dit CRF1A1, représentant 60,2 MtCO₂éq en 2010) plus émissions fugitives (dit CRF1B, représentant 5,4 MtCO₂éq en 2010) on a :

³² http://www.themavision.fr/upload/docs/application/pdf/2016-03/synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne_2016-03-17_17-50-30_662.pdf

**Tableau 14 : Emissions de GES au périmètre Kyoto
des CRF 1A1 et CRF1B**



Emissions de GES de l'industrie de l'énergie (production d'énergie et émissions fugitives) - Kyoto (Mt CO2e)								
	1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030 / 1990 (%)
AME	77,2	65,6	61,7	65,9	73,6	82,9	88,4	7%
AMS2	77,2	65,6	54,4	54,4	54,4	44,0	33,0	-43%

Source : CITEPA

Émission du secteur de l'industrie de l'énergie – source, Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035, DGEC, 2015

La LTECV, la SNBC font clairement une différence entre les scénarios AME et AMS2 dans les évolutions d'émissions du secteur de la production d'énergie. Mais la décarbonation effective du secteur est tardive, et entamée à partir de 2025.

3.9. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) des énergies renouvelables en France métropolitaine – avril 2016

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) est en principe intégrée, toutes énergies confondues. Cependant les PPE des zones non interconnectées et des énergies renouvelables ont été proposées en avance de phase.

L'arrêté du 24 avril 2016 relatif « aux objectifs de développement des énergies renouvelable », et plus précisément à la programmation des capacités de production d'énergie renouvelable en France métropolitaine, dit PPE pour les énergies renouvelables en France métropolitaine, porte tant sur la production électrique que la production de chaleur. Il donne les objectifs suivants pour 2018 et 2023 pour les EnR électriques³³:

³³ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000032452174&categorieLien=id>

Puissance installée en MW	2014 (pour mémoire)	31 décembre 2018	31 décembre 2023 – hypothèse basse	31 décembre 2023 – hypothèse haute
Hydroélectricité (Puissance installée et énergie produite/an)	25 300 MW et 62,9 TWh	25 300 MW et 61 TWh	25 800 MW et 63 TWh	26 050 MW et 64 TWh
Éolien terrestre	9 300	15 000	21 800	26 000
Solaire PV	5 300	10 200	18 200	20 200
Éolien en mer posé		500	3000 MW. Pour les projets attribués, entre 500 et 6 000 MW de plus, en fonction des concertations sur les zones propices, du retour d'expérience de la mise en œuvre des premiers projets et sous condition de prix	
EMR (éolien flottant, hydrolén, etc.)			100 MW. Pour les projets attribués, entre 200 et 2 000 MW de plus, en fonction du retour d'expérience des fermes pilotes et sous condition de prix	
Bois-énergie	297	540	790	1 040
Méthanisation	85	137	237	300
Géothermie électrique		8	53	
Total	40 300	51 685	69 980	76 743

Tableau 1 : PPE pour l'électricité renouvelable – Source, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000032452174&categorieLien=id>

Ces objectifs, compatibles avec un objectif de 40 % de la consommation électrique finale issue d'énergies renouvelables en 2030 en supposant une production électrique stable, sont très ambitieux.

L'objectif sur l'hydroélectricité est plus bas que celui de la PPE précédente en date de 2009³⁴ qui visait une augmentation de 3 GW fin 2020.

Sur l'éolien terrestre l'objectif reste ambitieux, au regard des problèmes d'acceptabilité rencontrés (pour mémoire la PPE de 2009 visait 11 500 MW au 31 décembre 2012, dont 10 500 à partir de l'énergie éolienne à terre et 1 000 MW à partir de l'énergie éolienne en mer et des autres énergies marines ; 25 000 MW au 31 décembre 2020, dont 19 000 à partir de l'énergie éolienne à terre et 6 000 MW à partir de l'énergie éolienne en mer et des autres énergies marines).

En matière de photovoltaïque, le potentiel est considérable, tant en matière de sites (sols dégradés) que de potentiel technique, les technologies sont au point et les coûts sont au niveau de la parité réseau (les derniers appels d'offre pour du PV au sol fournissent des prix de 70€/MWh), il s'agit essentiellement d'un problème de financement du déploiement, couplé à une problématique d'origine des technologies, pour des raisons de bilan carbone global (énergie grise, empreinte carbone) et de compétitivité économique. Pour mémoire, la PPE de 2009 était en retrait de la croissance observée et stipulait, pour l'énergie radiative du soleil, en termes de puissance totale installée : 1 100 MW au 31 décembre 2012 ; 5 400 MW au 31 décembre 2020.

Les objectifs en matière de chaleur renouvelable sont les suivants :

Production annuelle d'énergie kTep ³⁵	2014	31 décembre 2018	31 décembre 2023 – hypothèse basse	31 décembre 2023 – hypothèse haute
Biomasse	10 700	12 000	13 000	14 000
Pompes à chaleur	1 600	2 200	2 800	3 200
Solaire thermique	150	180	270	400
Biogaz	100	300	700	900
Géothermie	100	200	400	550
Total	12 650	16 230	17 170	19 050
Énergie renouvelable et de récupération livrée par les réseaux	1 215	1 350	1 900	2 300

Tableau 2 : PPE pour la chaleur (et le froid) renouvelable – Source, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000032452174&categorieLien=id>

³⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021645812> et <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021645812&categorieLien=id>

³⁵ 1 kTep est 1000 tonnes équivalent pétrole, ou encore 11,63 GWh

Le dispositif emblématique de soutien financier des projets de production de chaleur à partir des énergies renouvelables est le fonds chaleur,³⁶ créé en décembre 2008, doté d'une enveloppe de 1,59 Md€ sur la période 2009-2015. En 2015 avaient ainsi été évitées environ 1,3 Mtep fossiles ou encore 3,2 MtCO₂éq. Le fonds chaleur vise une production de chaleur renouvelable de 5,5 Mtep à l'horizon 2020 et 6 MtCO₂éq évitées, avec un plateau de 2022 à 2030 (si l'on prend en compte les projets financés de 2009 à 2020 et la durée de vie des installations)³⁷.

Dans ce segment de la chaleur renouvelable, les objectifs de la PPE en matière de bois énergie sont selon la DGEC ambitieux mais réalistes. Il convient cependant d'articuler ce développement avec celui du bois matériau voire de la production agricole. Des travaux en ce sens ont débuté le 3 mai 2016 pour l'élaboration d'une stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB) et de schémas régionaux biomasse (SRB), prévus par la LTECV. La cohérence avec le programme national de la forêt et du bois (PNFB) doit être recherchée, ce dernier prévoyant une « mobilisation supplémentaire du PNFB de +12 Mm³ de bois récolté commercialisé à l'horizon 2026 correspond à une offre additionnelle potentielle de bois susceptible d'être valorisée pour la production d'énergie représentant 2,3 Mtep (dans une fourchette de 1,9 à 2,7 Mtep) ». Notamment, l'offre doit être suffisante, sous peine de devoir importer.

En ce qui concerne les pompes à chaleur, la PPE tient compte de l'essor actuel de cette technologie. Sur le solaire thermique, l'ambition est modérée.

De plus, en matière de biogaz, les objectifs sont de 1,7 TWh de biométhane injecté dans le réseau de gaz en 2018 et 8 TWh en 2023 ; en matière de carburants, les objectifs sont de 0,7 TWh de bioGNV en 2018 et 2 TWh en 2023 ; et pour les biocarburants avancés, 1,6 % en filière essence et 1 % en filière gazole en 2018, et 3,4 % en filière essence et 2,3 % en filière gazole en 2023.

3.10. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de juillet 2016

3.10.1. France métropolitaine

Un projet de programmation pluriannuelle de l'énergie complète a été publié dans le cadre d'une consultation le 1^{er} juillet 2016³⁸.

La PPE prend en compte deux scénarios, un scénario haut correspondant à la poursuite des tendances passées, un scénario bas correspondant à la mise en œuvre de la LTECV et aux orientations de la PPE. Par rapport à une consommation de 155,1 Mtep en 2012, la consommation baisse de 12,6 % en 2023 dans le scénario bas (-1,2 % par an) et de 3,1 % en 2023 dans le scénario haut (-0,3%) par an.

En ce qui concerne l'offre d'énergie :

- La production d'électricité retient un objectif de production de 150 à 167 TWh de production d'origine renouvelable en 2023 (cf. *Supra*). Elle prévoit une

³⁶ Voir par exemple <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Presentation-generale.25027.html> ou <http://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-l'action/produire-chaleur/fonds-chaleur-bref>

³⁷ Source : DGEC, novembre 2015

³⁸ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2_-_Synthese.pdf ou voir aussi <http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-programmation-pluriannuelle-de-l-energie-a1526.html>

réduction de la production d'origine nucléaire entre 10 et 65 TWh. Une meilleure flexibilité permet d'éviter la construction de centrale thermique ;

- Pour le gaz, la PPE souligne les incertitudes sur les évolutions de consommation, liées à sa part de marché dans les transports (navires et poids-lourds). Elle prévoit le développement de la production de biogaz à hauteur de 13,5 TWh pour la cogénération et 6 TWh pour le biogaz injecté en 2023 et celle de bio GNV à hauteur de 2TWh en 2023, avec à cette échéance 3 % du parc de poids lourds fonctionnant au GNV ;
- La consommation de pétrole devrait baisser., légèrement dans le scénario haut, de 15 % à échéance 2023 dans le scénario bas. Le développement des biocarburants de 2ème génération est envisagé avec des taux d'incorporation de 3,4 % pour l'essence et 2,3 % pour le gazole à échéance 2023 ;
- La consommation de chaleur (dont une partie est fournie par l'électricité, le gaz et les produits pétroliers) connaît une tendance baissière. Elle représentait en 2013 70,6 Mtep, soit 47 % de la consommation finale totale d'énergie. En 2030, il est prévu dans le scénario haut une consommation de 60 Mtep et dans le scénario bas une consommation de 54 Mtep. La part de renouvelable dans ce scénario représente entre 17 et 19 Mtep en 2023.

Par avis délibéré n°2016-57 adopté le 24 août 2016³⁹, l'Autorité environnementale du CGEDD s'est d'ailleurs étonnée de la présentation du scénario « haut », qui n'est pas cohérent avec la LTECV et ne respecte pas les objectifs de la loi. De manière plus générale elle insiste aussi sur l'importance du dispositif de suivi des mesures afin d'assurer qu'ils permettront d'atteindre les objectifs de la loi. Elle regrette aussi le caractère succinct de la description de certaines filières et des arbitrages entre filières

3.10.2. Corse

La situation en Corse est classiquement de dépendance envers les approvisionnements extérieurs, avec une prépondérance des consommations liées aux transports, et des émissions par tête de 8,5 tCO₂/an contre 6,5 tCO₂/an en moyenne nationale.

La PPE pour la Corse pour 2016-2016/2019-2023⁴⁰ vise notamment à moderniser l'appareil de production, à développer les EnR électriques (+50 % en 2023 par rapport à 2015) et thermiques (+40 % en 2023 par rapport à 2015) et à améliorer l'efficacité énergétique (+200 % en 2023 par rapport à 2015).

Le décret n° 2015-1697 du 18 décembre 2015 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie de Corse⁴¹ présente les objectifs suivants.

³⁹ http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/160824_-_PPE_France_metropolitaine_-_delibere_cle21133e.pdf

⁴⁰ http://www.corse.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PPE_Corse-Septembre2015.pdf

⁴¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031645870&categorieLien=id>

Filière production électrique	Puissance installée supplémentaire par rapport à 2015 (MW)	
	2018	2023
Éolien sans stockage	+0	+12
Éolien avec stockage	+6	+6
Petite hydroélectricité	+7	+12
Biomasse et biodéchets	+3	+7
Solaire photovoltaïque sans stockage (toiture)	+11	+20
Solaire photovoltaïque avec stockage	+11	+24
Solaire thermodynamique	+12	+12
Total électrique	+50	+93
Filière production de chaleur	Production supplémentaire par rapport à 2015 (GWh)	
	2018	2023
Solaire thermique	+7	+20
Systèmes aérothermiques	+25	+60
Bois-énergie	+32	+50
Total chaleur	+64	+130

Tableau 3 : PPE pour la Corse – source, décret n° 2015-1697 du 18 décembre 2015 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie de Corse, <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000031645870&categorieLien=id>

L'Autorité environnementale du CGEDD a rendu son avis n°2016-59⁴² en date du 9 septembre 2015. Elle suggère entre autres d'étoffer la partie dévolue aux transports, ainsi que de manière plus générale détailler les raisons et impacts des choix effectués.

La PPE pour la Corse a été adoptée par décret le 18 décembre 2015⁴³.

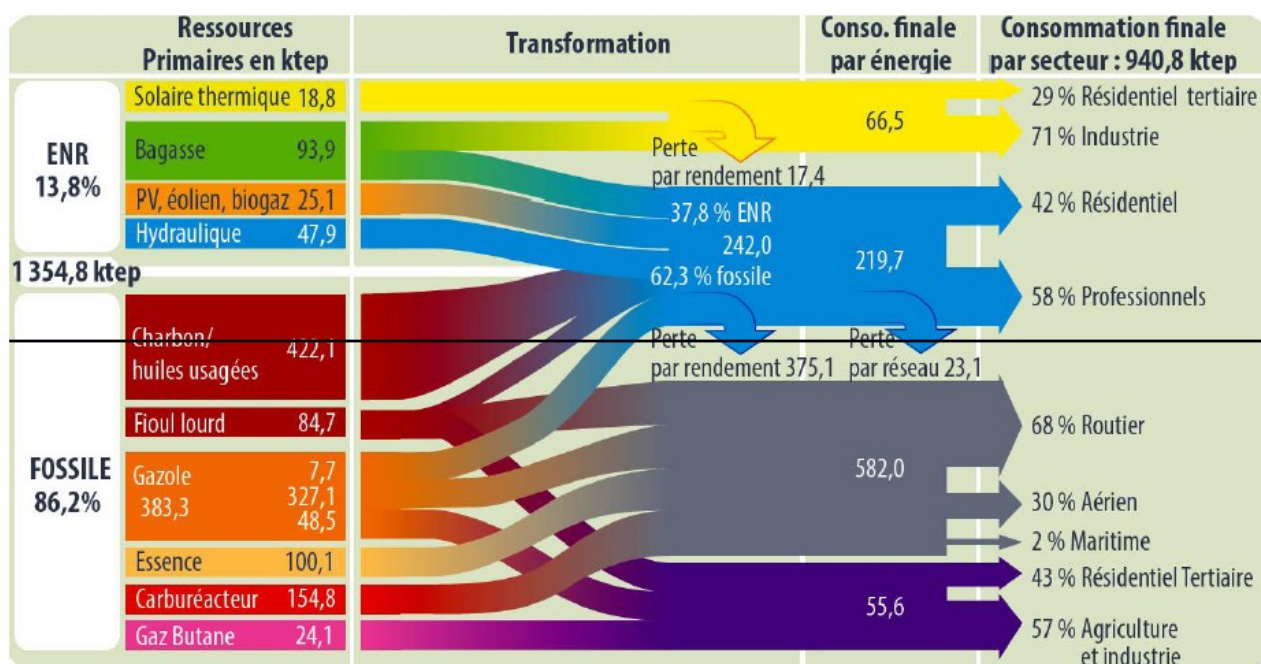
⁴² http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/150909_-_PPE_Corse_20_-_delibere_cle71cd6b.pdf

⁴³ <http://www.corse.developpement-durable.gouv.fr/la-ppe-pour-la-corse-approuvee-par-decret-du-18-a1299.html>

3.10.3. Réunion

Pour les départements d'outre-mer, très dépendants des approvisionnements extérieurs, la LTECV vise « l'autonomie énergétique dans les départements d'outre-mer à l'horizon 2030, avec, comme objectif intermédiaire, 50 % d'énergies renouvelables à l'horizon 2020 ».

La PPE de la Réunion⁴⁴ arrêtée le 30 juin 2015, expose d'abord la situation énergétique de l'île.



(Source : Observatoire Énergie Réunion)

Schéma énergétique de la Réunion – Source, Programmation pluriannuelle de l'énergie Réunion, 2016-2018 et 2019-2023, <http://energies-reunion.com/wp-content/uploads/2015/08/PPE-arre%CC%82te%CC%81e-AP-300615.pdf>

Les objectifs de développement des énergies renouvelables sont de produire en 2018 30 % d'électricité à partir de biomasse ou biocarburant en substitution du charbon, et 60 % en 2023 ; de rajouter une capacité de méthanisation de +2,5 MW en 2018 par rapport à 2014, et encore +3,5MW en 2023 par rapport à 2018 ; d'augmenter la capacité de gazéification de biomasse de 1MW en 2018 par rapport à 2014, et encore 1 à 3 MW en 2023 par rapport à 2018 ; de valoriser les déchets ; d'explorer le potentiel géothermique ; de rajouter +0,5 MW de petite hydroélectricité à l'horizon 2018, et encore 1 MW de 2018 à 2023 ; de mettre en service en 2023 une installation de 38 MW de grande hydroélectricité ; d'explorer le potentiel des énergies marines.

L'Autorité environnementale du CGEDD a rendu son avis n°2015-65 le 4 novembre 2015⁴⁵ où elle estime que les mesures proposées ne permettront pas d'atteindre l'autonomie énergétique prévue par la loi, d'où la recommandation d'un dispositif de suivi des impacts, tant en termes de production que de conséquences sur l'environnement.

⁴⁴ <http://energies-reunion.com/wp-content/uploads/2015/08/PPE-arre%CC%82te%CC%81e-AP-300615.pdf>

⁴⁵ http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/151104_-_PPE_Reunion_974_-_delibere_cle21a65b.pdf

3.10.4. Autres

Les autres PPE sont en cours d'élaboration à la date de rédaction de la présente annexe.

3.11. Tableau récapitulatif des exercices des projections post 2013

Le tableau ci-après récapitule les éléments des différents scénarios post 2013

Scénario	Conso actuelle (Mtep)	Émission actuelle (MtCO2eq)	Conso 2030 (Mtep)	Émission 2030 (MtCO2eq)	Part EnR 2030 (%)	Conso 2050 (Mtep)	Émission 2050 (MtCO2eq)	Part EnR 2050 (%)
ADEME 2013	151 (Valeur 2010 hors consommation non énergétique) Résidentiel 44 Tertiaire 22 Transport 44 Industrie 36	525 (Valeur 1990) Production énergie 69 Transport 113 Résidentiel/ Tertiaire 101 Industrie 129 Agriculture 97 Déchets 14	123 Résidentiel 33 Tertiaire 19 Transport 36 Industrie 33	313 Production énergie 20 Transport 98 Résidentiel/ Tertiaire 36 Industrie 73 Agriculture 70 Déchets 15	35 % électricité 47 % combustibles 44 % réseau chaleur 75 % gaz 14 % carburants 9 %	82 Résidentiel 22 Tertiaire 16 Transport 15 Industrie 27	131 Production énergie 3,1 Transport 8,5 Résidentiel/ Tertiaire 6 Industrie 54 Agriculture 51 Déchets 7,6	>55 % électricité non déterminé combustibles 55 % réseau chaleur 100 % gaz 56 % carburants 66 %
DEC	154 Résidentiel 45 Tertiaire 22 Transport 45 Industrie 37		142 Résidentiel 36 Tertiaire 22 Transport 40 Industrie 40	248 (émissions CO2 énergétiques)	24 %	124 Résidentiel 33 Tertiaire 21 Transport 30 Industrie 37	140 (émissions CO2 énergétiques = 103)	40 % électricité 21 % gaz 0% réseau chaleur 90%
DIV	154		135 Résidentiel 41 Tertiaire 20 Transport 31 Industrie 38	195 (émissions CO2 énergétiques)	40 %	118 Résidentiel 34 Tertiaire 17 Transport 29 Industrie 35	130 (émissions CO2 énergétiques = 111)	52 % électricité 43% gaz 16% réseau chaleur 100%
EFF	154		120	205	32 %	78	75	63 %

			Résidentiel 30 Tertiaire 18 Transport 36 Industrie 33	(émissions CO2 énergétiques)		Résidentiel 19 Tertiaire 15 Transport 15 Industrie 27	(émissions CO2 énergétiques = 62)	électricité 70 % gaz 47 % réseau chaleur 100 %
SOB	154		110 Résidentiel 33 Tertiaire 17 Transport 27 Industrie 28	189 (émissions CO2 énergétiques)	42 %	72 Résidentiel 21 Tertiaire 11 Transport 16 Industrie 21	50 (émissions CO2 énergétiques = 34)	électricité 92 % gaz 92 % réseau chaleur 100 %
LTECV	167		134 (-20% par rapport à 2012)	315 (-40 % par rapport à 1990)	32 %	83,5 (-50% par rapport à 2012)		
SNBC				315 (Décomposition pour années 2024-2028 total 360) Production énergie 55 Transport 96 Résidentiel/ Tertiaire 48 Industrie 68 Agriculture 80 Déchets 13			140	
Scénario prospectif Énergie – Climat – Air pour la France à horizon 2035 AMS2	155 (Valeur 2012)		121 Résidentiel 30 Tertiaire 18 Transport 41 Industrie 29	317 Production énergie 44 Transport 85 Résidentiel/ Tertiaire 37,6 Industrie 68 Agriculture 71 Déchets 12	énergie 34 % chaleur 46 %			

4. Aspects économiques, problèmes et solutions

4.1. La problématique des prix du carbone dans l'énergie

Le sujet du ou des « prix du carbone » est d'actualité depuis quelques années. Il est central tant dans le domaine industriel en général que dans le secteur des industries productrices d'énergie.

Le rapport Quinet sur « la valeur tutélaire du carbone »⁴⁶ propose en 2010 : 32 € / t CO₂ éq., en 2020 : 56 € / t CO₂ éq., en 2030 : 100 € / t CO₂ éq. Et en 2050 : autour de 200 € / t CO₂ éq. (150 € – 350 €).

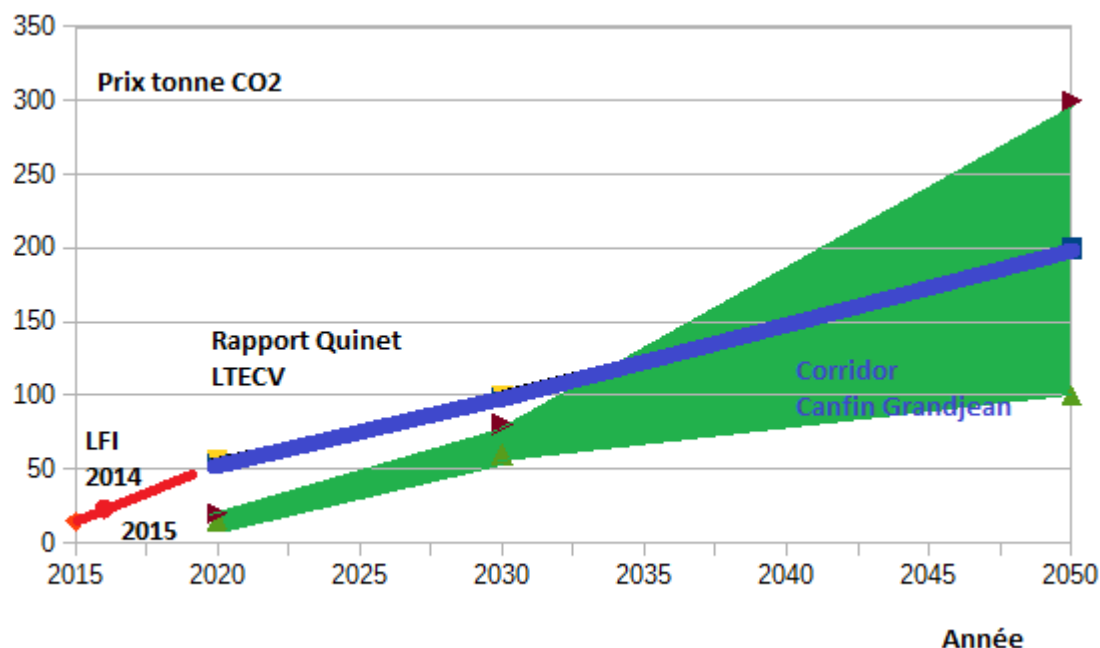
L'article 32 de la loi de finances pour 2014 introduit au sein des taxes intérieures de consommation sur les produits énergétiques une « composante carbone » de 7€/tCO₂ en 2014, 14,5€/tCO₂ en 2015, 22€/tCO₂ en 2016.

Le rapport Canfin-Grandjean remis le 18 juin 2015 propose « un "corridor carbone" ou d'une "cible carbone" doté d'un prix minimum de 15/20 dollars la tonne de CO₂ avant 2020 et d'un prix cible maximum de 60/80 dollars la tonne en 2030/2035 » même si « *il serait souhaitable que ce signal atteigne dans les décennies à venir des niveaux de l'ordre de 100 à 300 dollars la tonne de CO₂* ».

La LTECV du 17 août 2015 dispose dans son article 1 alinéa VIII que « *Le Gouvernement se fixe pour objectif, pour la composante carbone intégrée aux tarifs des taxes intérieures sur la consommation des produits énergétiques inscrites au tableau B du 1 de l'article 265 du code des douanes, d'atteindre une valeur de la tonne carbone de 56 € en 2020 et de 100 € en 2030* ».

La loi de finances rectificative 2015 prévoit que la taxe carbone, appliquée depuis 2014 aux consommations d'énergie fossile (produits pétroliers, gaz et charbon), augmentera de 8,50 € par tonne de CO₂ en 2017, passant à 30,50 € par tonne, puis 39 € en 2018 et 47,5 € en 2019.

⁴⁶ <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/094000195/index.shtml>



Évolutions prévisionnelles de la taxe carbone

Le Président de la République a annoncé fin avril 2016 que la France s'engagerait «*unilatéralement à donner un prix plancher au carbone*». Mais les tentatives de la ministre de l'Environnement de pousser le sujet au niveau européen depuis avril 2016 se heurtent par exemple à la position du commissaire européen à l'énergie, partisan du marché pour la fixation des prix plutôt que de prix plancher ou plafond. D'autres États membres craignent que la mise en place d'un corridor de prix conduise à rouvrir la décision sur la réserve de stabilité du marché carbone EU ETS (adoptée en 2015 après une négociation difficile), et qu'elle requalifie le marché carbone en taxe⁴⁷, nécessitant alors une prise de décision à l'unanimité. De plus selon certains économistes⁴⁸, «*imposer unilatéralement un prix plancher du carbone à la production française d'électricité, mesure annoncée fin avril par le président François Hollande, n'aurait qu'un bénéfice climatique limité*», car la production d'électricité est déjà très décarbonée «*(gaz 4 %, charbon 1,6 %, fioul 0,6 %)*. Le renchérissement de la production thermique domestique entraînerait aussi une hausse des importations, d'Allemagne notamment, dont le mix électrique reposait à 42 % sur le charbon et le lignite en 2015». En pratique, les dernières centrales au charbon françaises fermeraient, avec une amélioration sur les émissions nationales, mais les émissions réduites en France se déplaceraient à l'étranger. En dépit de sa vertu d'exemplarité, et de décarbonation du système de production énergétique national, cette mesure limitée au sol national est sans doute insuffisante, et doit continuer à être promue au niveau européen afin de prendre la pleine mesure de son efficacité. En octobre 2016, le gouvernement a finalement décidé de ne pas mettre en place immédiatement de prix plancher pour les cinq centrales à charbon françaises et de privilégier un étalement dans le temps.

⁴⁷ Cette crainte paraît infondée : un rapport d'avocat européen estime que le corridor n'a pas une nature fiscale puisqu'il n'entraîne pas de prélèvement obligatoire au profit de l'État.

⁴⁸ Chaire Économie du Climat de l'université Paris-Dauphine – <http://www.chaireeconomieduclimat.org/publications/info-debats/id-46-impacts-dun-prix-plancher-co2-secteur-electrique/> ou article Enerpresse N°11598 – Mardi 21 juin 2016

Le rapport sur des « Propositions pour des prix du carbone alignés avec l'accord de Paris⁴⁹ », sous la responsabilité de Pascal Canfin, Gérard Mestrallet et Alain Grandjean examine cette question prolonge le rapport précédent prônant un « corridor carbone ». Il a été remis à la ministre chargée de l'énergie le 11 juillet 2016. Ce rapport note un large consensus sur le rôle décisif que peuvent jouer les instruments de tarification carbone et de finance climat, pour enclencher de façon efficace la transition bas carbone. Mais il constate une incohérence entre Accord de Paris, objectifs de l'Union européenne et fonctionnement du marché carbone européen. La surabondance de quotas européens a conduit à un prix très bas (5€/t CO₂), très inférieur au niveau nécessaire pour que cet instrument ait un rôle incitatif. Par ailleurs la possibilité de report des quotas brouille le signal pour l'avenir. De ce point de vue, un corridor de prix, combiné à une accélération de la réduction des quotas de 1,74 % aujourd'hui à 2,4-2,6 % après 2020, apporterait une amélioration pragmatique. Pour accélérer la sortie de l'utilisation du charbon dans la production française d'électricité, le rapport évoque trois solutions⁵⁰, et renvoie à des études techniques pour déterminer la plus intéressante : il ne faudrait en particulier pas selon lui substituer à la production française des productions étrangères émettant autant ou plus de gaz à effet de serre que les centrales dont on vise la fermeture et dont on devrait annuler les quotas. Le rapport prône enfin une généralisation d'un prix du carbone dans le monde, visant une tarification en 2020 de 25 % des émissions mondiales.

4.2. Des incertitudes importantes

Le constat du rapport de 2013 sur les incertitudes inhérentes au secteur de l'énergie restent actuelles.

Pour mémoire, selon le rapport de 2013, le secteur de l'énergie est le lieu d'incertitudes larges et évolutives de natures diverses, qui impactent significativement les calculs de coût et de rentabilité.

4.2.1. Technologie

Ces incertitudes sont technologiques (rythmes de maturation de techniques de production décarbonées – photovoltaïque notamment⁵¹ – ou de stockage de l'énergie – batteries, cycle hydrogène – qui constituent une clé du développement des énergies décarbonées intermittentes ; techniques de capture et de séquestration du dioxyde de carbone, et plus généralement techniques de géo-ingénierie ; développement des biocarburants de 2e et 3e générations ; ressources exploitables en hydrocarbures non-conventionnels (gaz de schiste notamment) et sur leurs conditions techniques et économiques).

⁴⁹ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_mission_12_juillet_19h10.pdf

⁵⁰ Taxe uniforme sur le secteur électrique, taxe sur les centrales à charbon, norme sur les émissions de gaz à effet de serre des centrales.

⁵¹ La décarbonation du photovoltaïque dépendant éminemment du lieu de production, mix énergétique, etc. Selon le rapport de 2012 <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/124000504/index.shtml>, cf annexe 4, les temps de retour carbone d'une installation PV en fonction du lieu de fabrication sont : Chine: 15,5-17,4 ans, Allemagne: 9,3-10,4 ans, France: 1,9-2,1 ans. Par contre les prix du photovoltaïque ont chuté et la parité réseau est proche voire atteinte.

4.2.2. Économie

Elles sont économiques (coûts mal connus, voire cachés, dynamiques mais peu prévisibles, incertitudes des conditions opérationnelles, Coûts d'investissements (Capex), Coûts d'opérations (Opex), etc. ; environnement réglementaire), financières (disponibilité des fonds, taux d'actualisation avec ou sans prime de risque, durée d'amortissement).

4.2.3. Géopolitique

Elles sont géopolitiques (sécurité et les coûts de l'approvisionnement en combustibles et en certaines matières premières stratégiques ; évolution des prix des combustibles fossiles⁵²). De fait, l'une des très grandes différences entre le contexte du rapport de début 2013 et celui de 2016 est la chute des prix du pétrole.



Prix du baril de pétrole Brent; Source : INSEE, <http://www.insee.fr/fr/themes/info-rapide.asp?id=79>

4.2.4. Politique de l'énergie

Les incertitudes sont aussi liées aux choix politiques concernant l'énergie (avenir de la production nucléaire ; la LTECV stipule une part de 50 % du nucléaire dans la production d'électricité en 2025, mais les évolutions sont peu claires à terme -cf. par exemple scénario Ademe 100 % renouvelables⁵³ en 2050), à l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels, à la politique agricole.

4.2.5. Acceptation sociale

Elles sont liées au degré d'acceptation par la population de contraintes nées du déploiement de la transition énergétique, par exemple du développement des éoliennes (terrestres ou en mer) ou hydroliennes, de l'extension de capacités de stockage hydraulique, du développement des capacités de stockage (géologique) d'air

⁵² En février 2012, date d'émission du rapport initial sur le facteur 4, le prix du baril était de 120 US\$. En mai 2016 il est de 40 US\$.

⁵³ « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, octobre 2015; <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

comprimé ou de dioxyde de carbone, des possibilités d'effacement ou d'alimentation du réseau par les particuliers, de la séquestration souterraine du CO₂, de techniques de géo-ingénierie, etc.

L'acceptation sociale de certaines techniques lourdement subventionnées (EnR) ou sensibles (nucléaire) peut aussi changer.

4.2.6. Autoproduction et autoconsommation

Elles sont aussi liées au degré d'initiative de la population, tant des particuliers ou entreprises, que des collectivités territoriales, dans le déploiement de la production / consommation locale (depuis les petits méthaniseurs, jusqu'à des centrales utilisant les déchets), ou d'autoproduction / autoconsommation (micro-éoliennes ou aux panneaux solaires), avec généralisation de réseaux locaux, et de nouvelles technologies de stockage de l'électricité (pas seulement par batteries). Un tel mouvement, peu anticipé, peu aller très vite (on peut citer les initiatives récentes d'entreprises de réseau ou d'autres en matière d'autoproduction/autoconsommation, ou le discours volontariste en faveur d'une énergie décentralisée).

On peut à ce titre mentionner la récente « Ordonnance n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité »⁵⁴ qui commence à établir un cadre et ouvre la porte à la prise en compte d'auto-producteurs et auto-consommateurs isolés ou groupés.

4.2.7. Ruptures

Elles sont enfin liées à l'ignorance habituelle, dans les scénarios proposés, de ruptures possibles, en général négatives, à impact potentiellement catastrophique : ciseau entre production et consommation énergétique, fortes variations de prix résultant éventuellement du phénomène précédent, assèchement du financement, catastrophes naturelles ou accidents technologiques avec effet domino et impact durable sur les mentalités, malveillance informatique (« cybercriminalité ») sur réseaux et installations.

4.2.8. Difficulté corollaire des prévisions

Malgré l'inertie qui caractérise les systèmes de production énergétique, ces incertitudes rendent difficiles les prévisions au-delà de 2025-2030 et peut-être à horizon plus court. De fait l'on est amené à proposer des scénarios caractérisés par les hypothèses qui les sous-tendent. Tout exercice de prospective est contraint de poser et expliciter des hypothèses fortes, dont ses prévisions sont fortement dépendantes. Un traitement statistique de la combinatoire associée aux variations de paramètres dans les scénarios est possible, par le biais de méthodes dites de Monte-Carlo par exemple, qui fournissent, au lieu d'une valeur à un horizon donné, un histogramme probabiliste de la distribution des valeurs possibles, avec leur probabilité respective. La mission n'a pas procédé à ce type de simulation requérant des outils dédiés.

Les prévisions technico-économiques d'ingénieurs se heurtent aussi à l'effet rebond, qui limite l'effet de mesure de limitations d'émissions par une consommation

⁵⁴ https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?sessionId=49F6902616C4A880AC8859F6728FA356.tpdila20v_1?cidTexte=JORFTEXT000032938257&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id&idJO=JORFCONT000032938226

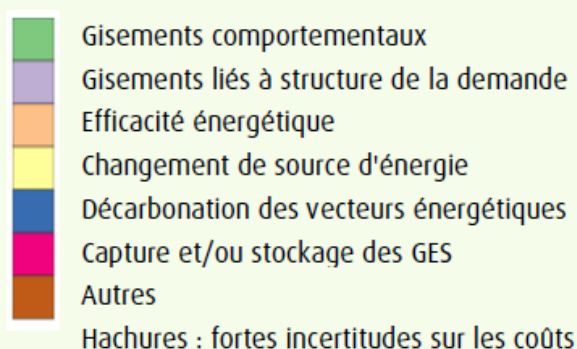
supplémentaire. Le rapport de 2013 faisait ainsi le constat que de nombreux auteurs raisonnent en termes de substitution d'énergie moins carbonée à de l'énergie plus carbonée, sans prendre explicitement en compte que toute offre nouvelle se traduit partiellement par une augmentation de la consommation si elle se traduit par une baisse des prix. En conséquence, afin d'améliorer la robustesse des études de prospective, il recommandait de développer la recherche sur les élasticités de la consommation d'énergie à l'offre, à court et à long terme, par secteur, etc.

En tout état de cause cette recherche est active, par exemple sur l'omniprésent effet rebond, et reste souhaitable. Mais elle ne contribue que très partiellement à réduire les incertitudes inhérentes au secteur.

4.3. Les trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût

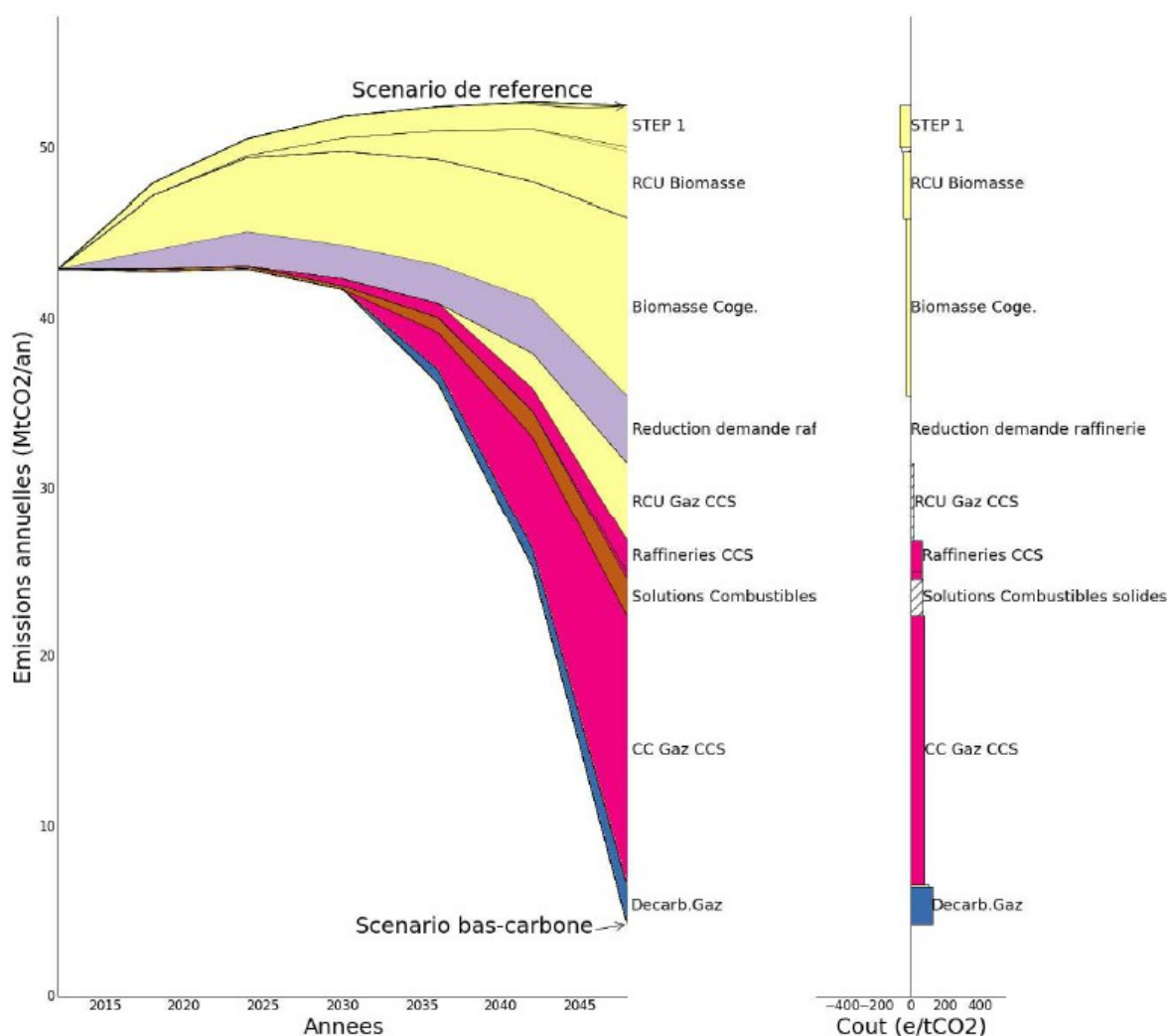
La question des coûts des mesures de limitation des émissions est centrale. La littérature est importante sur ce sujet. A titre d'exemple, une note du CGDD « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », dont un projet a été consulté en juin 2016 par la mission, présente des courbes dynamiques d'abattement moyen des émissions de GES permettant de quantifier les impacts et coûts de mesure, par secteur ou de manière intégrée.

Encadré 4 : Code couleur utilisé pour l'ensemble des figures



Pour la production d'énergie on a :

Figure 3 Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Énergie



Source: trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût, CGDD, 2016

Selon cette étude, la biomasse (cogénération, réseau de chauffage urbain....), ainsi que la capture et séquestration, font partie des mesures à plus fort impact.

4.4. Un système de production énergétique en évolution

Le système électrique français est inhabituellement décarboné en raison de la part prépondérante de l'électricité nucléaire puis hydraulique.

En tout état de cause le solde électrique de la France est positif vis-à-vis de tous ses voisins sauf l'Allemagne, dont l'électricité est de plus en plus carbonée. Le solde commercial électrique national a donc un impact indirect sur l'empreinte carbone du système de production électrique.

4.4.1. L'électricité nucléaire

L'électricité nucléaire est décarbonée si l'on fait abstraction du cycle de vie des centrales et que l'on se limite à leur période de fonctionnement⁵⁵.

La LTECV suppose une part du nucléaire de 50 % dans la production électrique en 2025. La PPE doit décrire la part du nucléaire dans le mix énergétique, de manière compatible avec la SNBC.

En principe⁵⁶, selon cette PPE, il faudra « *décider des fermetures et des prolongations de l'exploitation au-delà de 40 ans de certains réacteurs au cours de la deuxième période de la PPE* », soit 2019-2023. En vertu du plafonnement à 63,2 GW de la capacité nucléaire en France, il est prévu d'« *abroger par décret en 2016 l'autorisation d'exploiter des deux réacteurs de la centrale de Fessenheim* ».

4.4.2. Les technologies décarbonées matures (hors nucléaire)

La mission de 2013 propose de considérer comme économiquement mature (c'est-à-dire qu'il est, du point de vue économique, raisonnable de développer) une technologie capable de produire de l'énergie décarbonée utile à un coût inférieur ou égal au coût de revient de l'énergie nucléaire de seconde génération (type EPR) tel qu'estimé dans les rapports de la Cour des Comptes et du Sénat, soit 70 à 90 € / MWh -ces coûts du nucléaire sont cependant susceptibles d'évoluer à la hausse (cf. par exemple arrêté du 15 janvier 2016 fixant à 25 G€ le coût de stockage des déchets radioactifs haute activité vie longue).

4.4.2.1. Des solutions diverses

Les principaux gisements potentiellement exploitables dans cette catégorie portent essentiellement sur :

- la récupération de chaleur sous diverses formes : cogénération, géothermie, pompes à chaleur,
- l'hydraulique,
- la biomasse,
- le solaire thermique,
- le solaire photovoltaïque,
- l'éolien terrestre.

4.4.2.2. L'émergence du photovoltaïque

La mission de 2013 ne comptait guère sur le photovoltaïque pour des raisons de coût et recommandait d'« *encourager dès maintenant « sans modération » la récupération*

⁵⁵ De l'ordre de 6 gCO₂eq/kWh. Voir http://energie.lexpansion.com/energie-nucleaire/le-nucleaire-emet-moins-de-co2-que-le-solaire-et-l-eolien_a-32-5396.html qui cite les résultats du groupe du Paus Scherrer Institute aboutissant aux résultats suivants pour les émissions liées à la construction des unités de production (en gCO₂/kWh produit) : hydro 4 gCO₂/kWh, nucléaire 6 gCO₂/kWh, éolien 10-16 gCO₂/kWh, PV49-60 gCO₂/kWh, biomasse 75 gCO₂/kWh, géothermique 45 gCO₂/kWh Gaz CCG 423 gCO₂/kWh, charbon 903 gCO₂/kWh

⁵⁶ Dépêche AFP du 30/6/2016 « La feuille de route de la transition énergétique et du nucléaire en France une nouvelle fois repoussée »

de chaleur, l'hydraulique, l'utilisation de la biomasse non valorisable, l'énergie éolienne... » et d' « entreprendre une action pédagogique étendue, à la fois d'écoute et d'explication sur l'énergie éolienne terrestre ».

Force est de constater que les coûts du photovoltaïque ont suffisamment baissé pour être d'ores et déjà quasi-compétitifs⁵⁷ (au moins pour le PV au sol) et que les questions qui se posent ne sont pas des problèmes de potentiel ou de site disponible, mais de financement, de déploiement, et aussi d'empreinte carbone et de commerce extérieur au cas où il faudrait importer en grandes quantités des panneaux solaires produits dans des pays aux mix énergétique et industriel fortement carboné. Certaines études, qu'il convient d'expertiser et confirmer, sont à ce sujet critiques vis-à-vis du photovoltaïque quant au coût de la tonne de CO2 évitée⁵⁸. En tout état de cause il convient de privilégier un approvisionnement en matériel produit de manière décarbonée, si c'est possible dans le cadre des règles qui régissent les appels d'offre et plus généralement le commerce et la concurrence.

À ces conditions favorables s'ajoutent des évolutions tant en termes d'offres commerciales (autoproduction photovoltaïque et stockage par exemple) que d'environnement réglementaire (Ordonnance n° 2016-1019 du 27 juillet 2016 relative à l'autoconsommation d'électricité).

4.4.2.3. Des potentiels divers pour les autres EnR, dans un contexte de relatif retard

Par ailleurs le potentiel de développement de l'hydraulique reste limité et les objectifs de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de 2016 en la matière sont en retrait par rapport aux ambitions de la PPE 2009.

Par contre l'utilisation de la biomasse reste un fort potentiel.

Enfin l'éolien, qui est une solution incontournable (sous des formes cependant parfois très diverses) d'un certain nombre de scénarios volontaristes, et est selon l'étude précitée la seule EnR appropriée pour effectivement se substituer au gaz et au charbon compte tenu des profils de production et de demande⁵⁹, rencontre des difficultés d'acceptabilité. La recommandation pédagogique du rapport de 2013 reste donc d'actualité.

Le développement des énergies renouvelables, malgré des actions volontaristes, reste cependant en retrait des objectifs : « *En 2014 la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie est de 14,6 %, en retrait par rapport aux 16 % prévus par le plan national d'action (PNA).* »⁶⁰, sur toutes les composantes (électriques et thermiques), sauf l'objectif lié aux biocarburants.

⁵⁷ Il faut ajouter les coûts de l'intermittence, mais les derniers appels d'offres en France dans les zones non interconnectées aboutissent à des solutions PV plus stockage compétitives par rapports aux moyens de production traditionnels.

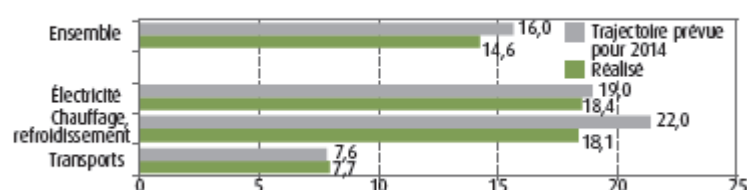
⁵⁸ Par exemple La lettre du Carbone n°4 – Carbone 4, juin 2016

⁵⁹ La lettre du Carbone n°4 – Carbone 4, juin 2016

⁶⁰ Chiffres clé de l'énergie – Édition 2015, CGDD, février 2016 http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2016/reperes-chiffres-cles-energie-2015.pdf

Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie, en 2014

En %



Champ : métropole et DOM.

Source : SOeS, bilan de l'énergie (réalisée) et PNA (trajectoire)

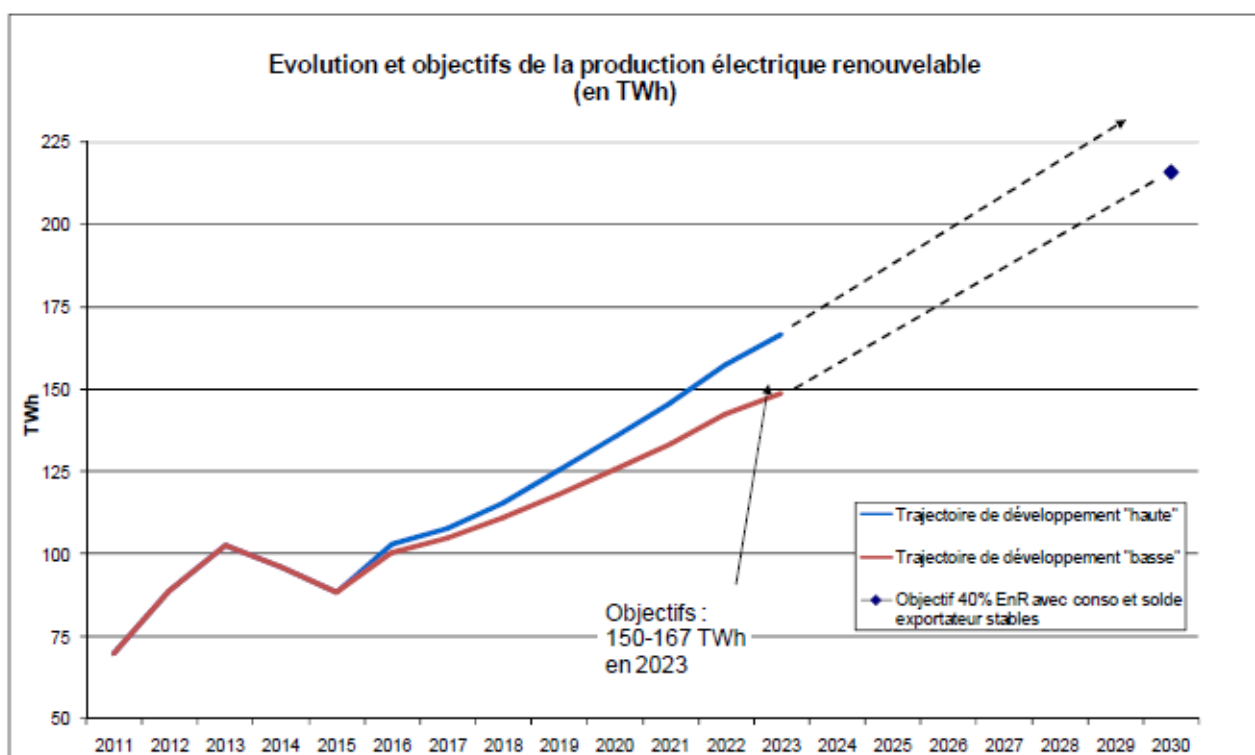
Parts des EnR dans la consommation finale - Source : Chiffres clé de l'énergie – Édition 2015, CGDD, février 2016

4.4.2.4. Une nouvelle PPE volontariste pour les EnR

La PPE pour les EnR (énergies renouvelables) a été détaillée *supra*. Elle est cohérente avec les objectifs français à l'horizon 2030, sous réserve d'hypothèses (par exemple sur le taux de croissance de la production d'électricité, qui est l'assiette de la part de l'électricité renouvelable) parfois ambitieuses (déploiement de certaines EnR) ou conservatrices (sur les prix de l'électricité).

La production d'électricité renouvelable en 2014 était de 96 TWh. Une progression linéaire conduirait à une production électrique renouvelable d'environ 155 TWh en 2023. Dans le projet d'arrêté sur la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) sur les énergies renouvelables, sorti le 6 avril 2016, l'ensemble des objectifs quantitatifs de développement permet d'atteindre une production d'électricité renouvelable entre 150 et 167 TWh par an en 2023. En 2023 l'hypothèse basse est de 69,93 GW installés et l'hypothèse haute de 76,74 GW ; pour mémoire la capacité installée en 2014 est de 40,3 GW et la projection 2018 à 50,985 GW.

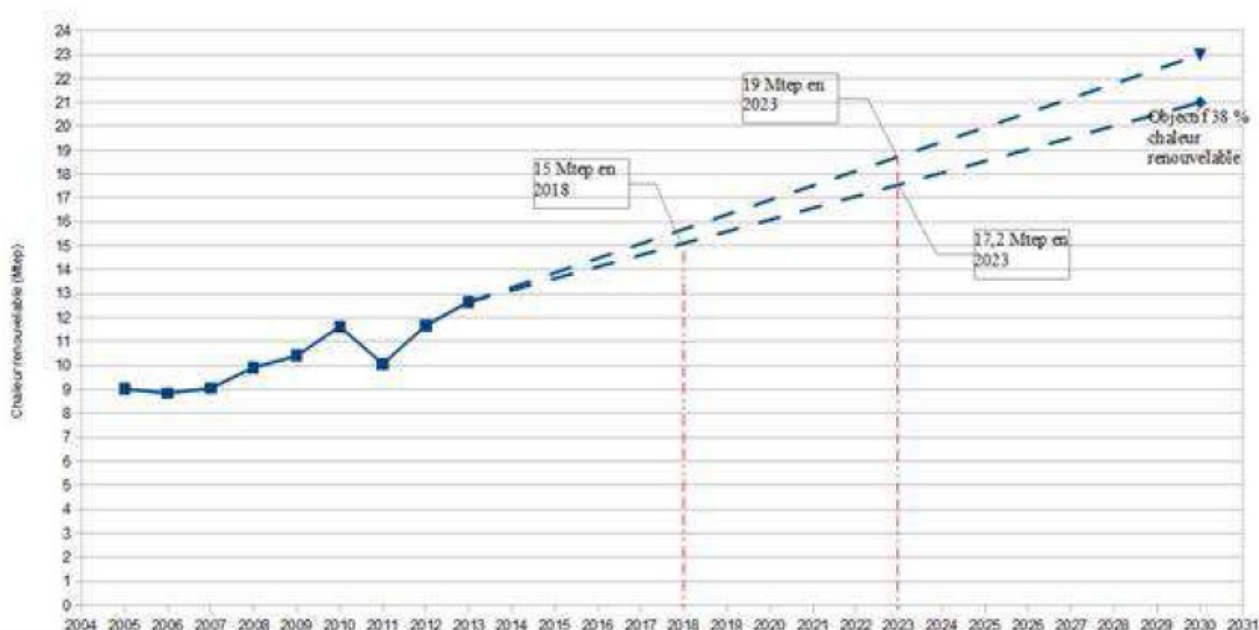
L'atteinte des objectifs suppose de se placer sur la partie haute de la fourchette de capacité estimée réalisable par les professionnels.



PPE électrique 2016 - Source : communication DGEC au collège énergie et climat du CGEDD-CGE, 23 juin 2016

Les objectifs de la PPE en matière d'éolien sont très ambitieux. Notamment les objectifs pour l'éolien en mer posé et pour les énergies marines renouvelables ont été substantiellement revus à la hausse à l'horizon 2023.

Pour la chaleur, les objectifs de la PPE sont aussi volontaristes et en ligne avec l'objectif 2030 de 38 % de chaleur renouvelable stipulé par la LTECV :



PPE chaleur 2016 - Source : communication DGEC au collège énergie et climat du CGEDD-CGE, 23 juin 2016

La chaleur renouvelable est actuellement (2016) peu rentable, ce qui pose un problème de modèle économique.

4.4.3. Les technologies décarbonées en gestation

Un ensemble de techniques ayant prouvé leur faisabilité technique laisse entrevoir des possibilités fructueuses pour l'avenir, mais ces techniques ne sont pas actuellement parvenues à un stade où leur exploitation en vue d'économies massives de GES dans les conditions du marché soit possible :

- soit pour des raisons de coût de revient, comme en 2011 le stockage électrochimique de l'énergie (batteries) ou les dispositifs en mer (éolien offshore, énergies marines...) ; le photovoltaïque était en 2011, selon le rapport de 2013 environ 2,5 fois « trop cher » dans les techniques de l'époque, en 2016 le photovoltaïque s'approche cependant de la parité réseau avec des prix de PV au sol de 70€/MWh proposés lors d'appels d'offres récents, et son temps de retour carbone est d'environ deux ans si produit en France ;
- soit pour des raisons encore de l'ordre de la mise au point technique, comme la capture et séquestration du CO₂ ou le cycle hydrogène-pile à combustible, même si sur ce dernier point des véhicules commerciaux ont été lancés fin 2014 (Toyota Mirai) et si un appel à projets pour des « territoires hydrogène » a été lancé début mai 2016 en France.

Ces techniques connaissent des successions de générations technologiques avec entre elles des ruptures plus ou moins grandes. Elles requièrent des efforts de recherche ciblés sur les générations technologiques susceptibles d'atteindre la maturité économique, sans qu'on puisse prédire leur avenir avec précision.

Les technologies de stockage et de capture/séquestration du carbone méritent une attention particulière. Le stockage est important en raison de son association avec le déploiement des énergies renouvelables ; pour la France les besoins ne se feront pas sentir avant une décennie dans un contexte de réseau centralisé ; par contre dans le cas d'autarcie ou d'autonomie d'îlots et zones non interconnectées, le stockage peut devenir nécessaire plus rapidement. Des offres récentes permettent de coupler production d'EnR photovoltaïque et stockage par exemple, le but étant d'augmenter l'autoconsommation et corollairement d'effacer une partie des besoins.

4.4.3.1. Le stockage de l'énergie : des technologies très diverses

La question du stockage de l'énergie, notamment électrochimique, mérite une place prioritaire dans l'effort de recherche, si possible dans un cadre européen. On sait en effet qu'au-delà d'un certain stade⁶¹, le développement des énergies intermittentes sera tributaire des capacités de stockage de l'énergie : stockage thermique sous différentes formes (ballon d'eau chaude, réseaux de chaleur, sels fondus, stockage sensible en réservoirs, matériaux à changement de phase...), stockage hydraulique (stations de transfert d'énergie par pompage ou STEP, solutions techniquement mature, mais onéreuse), systèmes de stockage à air comprimé (CAES), batteries (dont le véhicule électrique sera sans doute un vecteur puissant de développement, tant en mobilité qu'après usage mobile, une batterie ayant encore 80 % de son potentiel d'utilisation étant réutilisable pour d'autres usages, par exemple le résidentiel), cycle hydrogène et piles à combustibles.

⁶¹ On évoque souvent le chiffre de 30 % de la puissance installée, mais il doit être largement modulé selon les circonstances. Des études plus récentes évoquent 60 ou 70 %.

Le tableau ci-après donne des exemples d'ordres de grandeur des caractéristiques de solutions disponibles.

Technologie	Capacité	Puissance	Délais de réaction	Coût des investissements (€/kW)	Durée de vie (nb de cycles)	Usage
Chaleur sensible	40 000 MWh	4-100 MW	heures	1000	> 10 000	Chauffage, climatisation habitat
Chaleur latente	100 MWh	10 MW		1000		Chauffage, climatisation habitat
STEP	1 à 20 GWh	0,03 à 2 GW	10 min	Qq centaines-qq milliers	11 000 et plus	Production, réseau
CAES	120 Mwh à 1,8 GWh	10 à quelques centaines de MW	1-10 min	Quelques centaines à 1 200	11 000-13 000	Stationnaire
Hydrogène	Très variable	Très variable	immédiat	150-3 000 pour PAC	Variable, va à 80 000h	Mobilité, stationnaire, réseau
Batteries électrochimiques	30-200 Wh/kg	200-1500 W/kg	> 1 s	200-2000 €/kWh	200-2 000	Stationnaire, mobile
Batteries à circulation	<200 MWh	0,2-5 MW	< 1s	100-200	> 10 000	Stationnaire
Volants d'inertie	0,5-10kWh	0,1-40 MW	5 ms à minutes	Qq centaines-10 000	10 000	Mobilité, industrie, réseaux
Supercondensateurs	5 Wh/kg	>10 kW/kg	1 s	20-40	> 1 000 000	Puissance : démarrage, freinage,...

Tableau 4 : Fourchettes de caractéristiques des technologies du stockage d'énergie

Des données publiées par l'ADEME⁶² donnent des éléments sur les maturités technologiques des différentes filières de stockage de l'électricité :

⁶² Étude sur le potentiel du stockage d'énergies (étude dite « PEPS »), ADEME, octobre 2013 ; <http://ademe.typepad.fr/files/peps---rapport-public1.pdf>

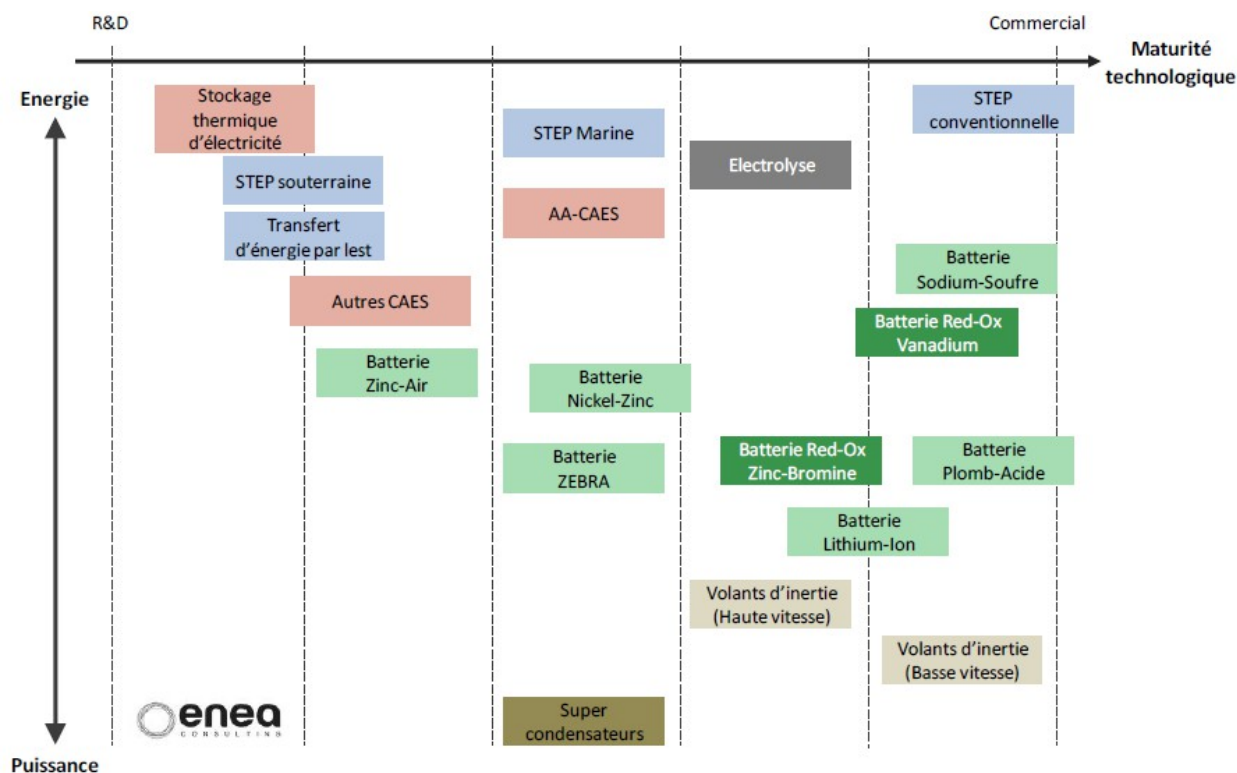
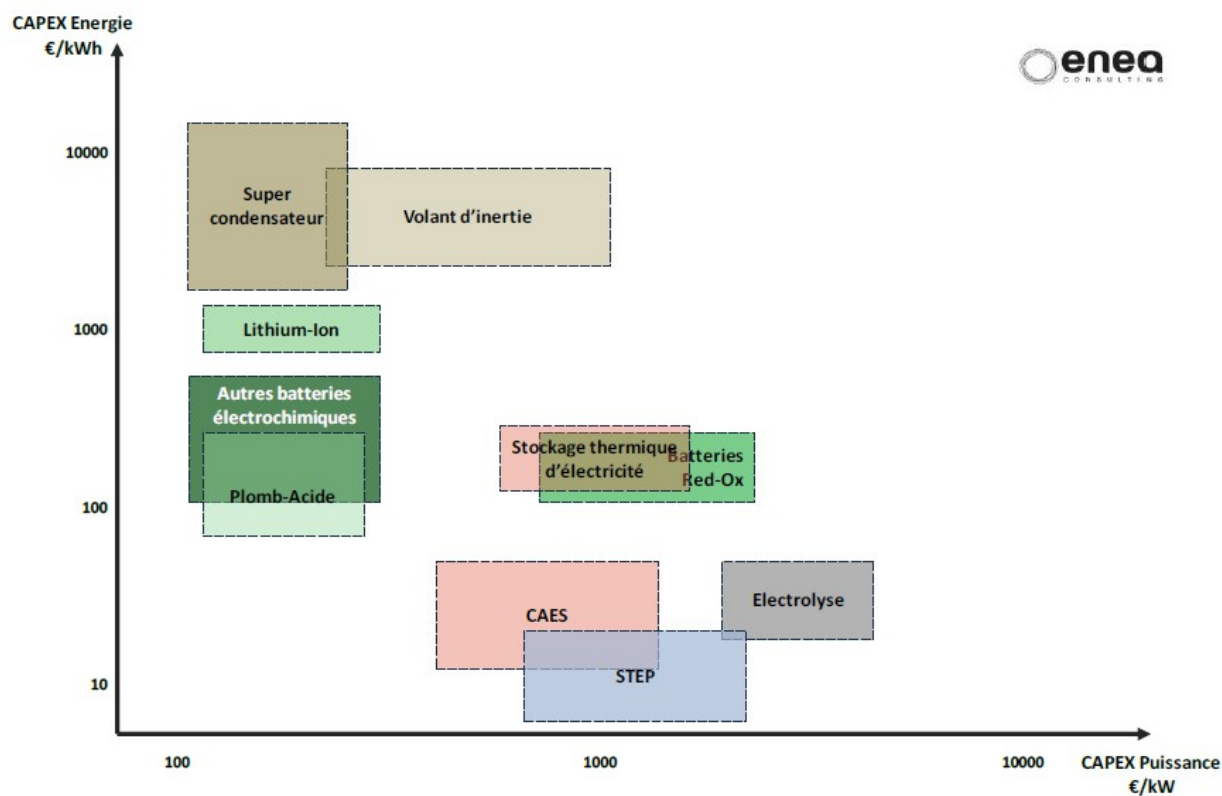


Figure 106 - Niveau de maturité technologique des moyens de stockage d'électricité

Niveau de maturité des moyens de stockage d'électricité – source, étude sur le potentiel du stockage d'énergies (PEPS) ADEME, octobre 2013

Ainsi que sur coûts en capital associés :



Coûts de la capacité et de la puissance des moyens de stockage d'électricité –

source, étude sur le potentiel du stockage d'énergies (PEPS) ADEME, octobre 2013

Et ainsi que sur les coûts de l'énergie déstockée sur le cycle de vie :

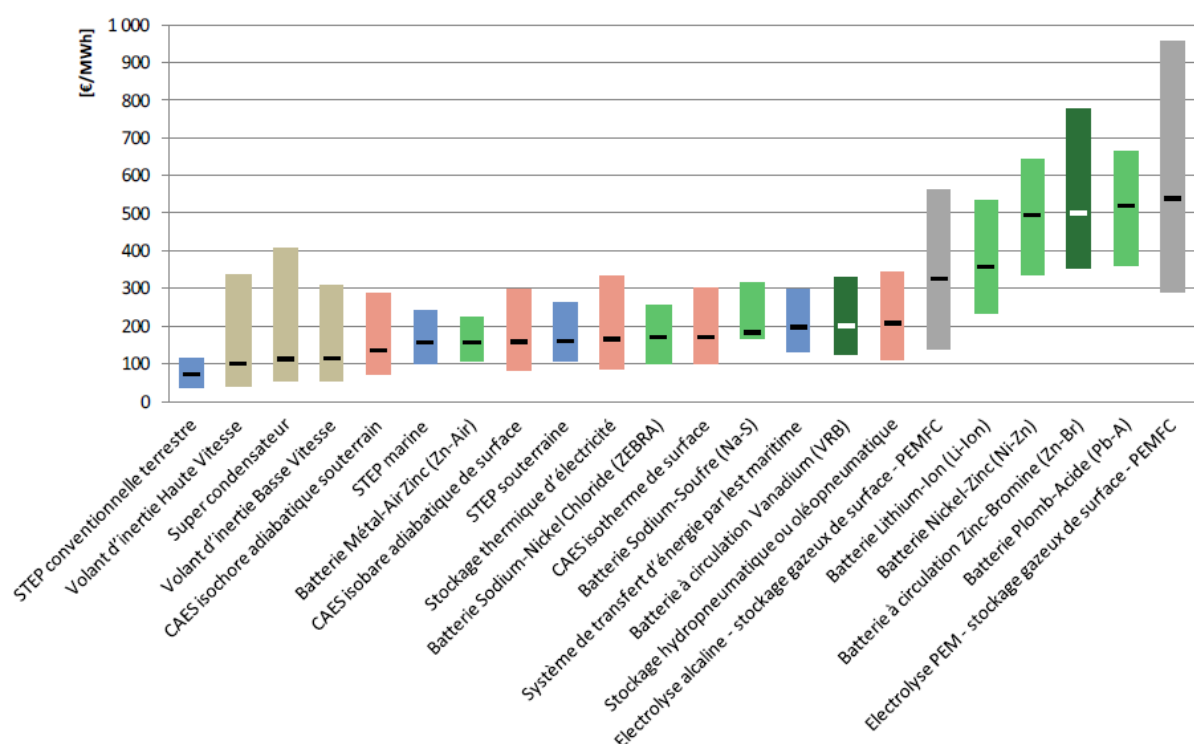


Figure 108 - Comparaison des LCOS (€/MWh délivré) pour les principales technologies de stockage d'électricité en 2013
Coût de l'énergie électrique déstockée en 2013 - source, étude sur le potentiel du stockage d'énergies (PEPS) ADEME, octobre 2013

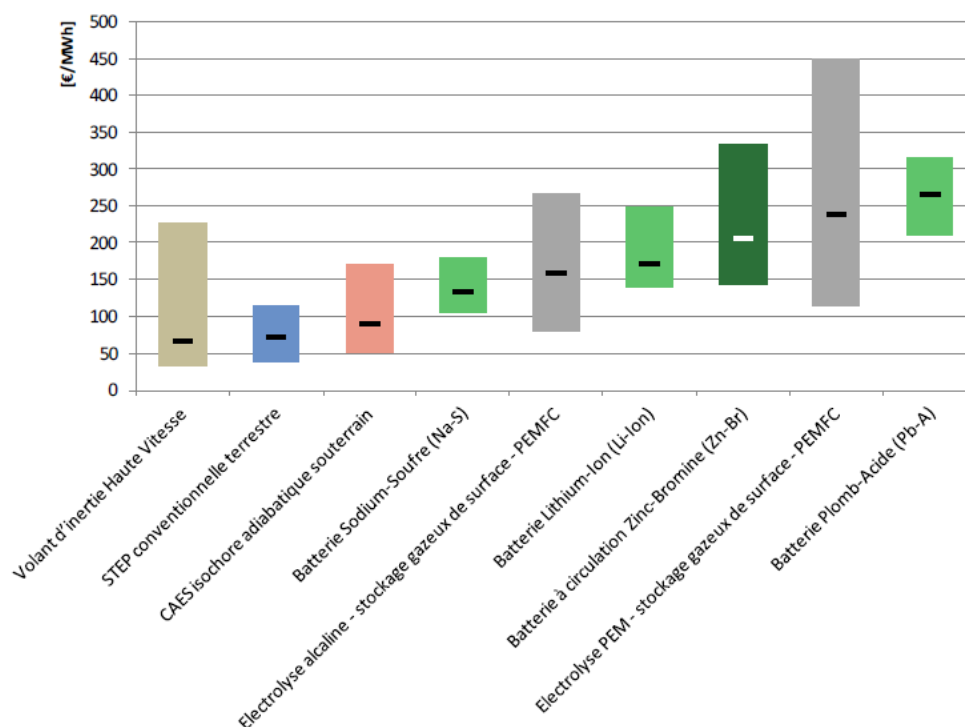


Figure 109 - Comparaison des LCOS (€/MWh délivré) pour les principales technologies de stockage d'électricité en 2030

Projection de coût de l'énergie électrique déstockée en 2030 - source, étude sur le potentiel du stockage d'énergies (PEPS) ADEME, octobre 2013

Des données sont aussi disponibles pour le stockage thermique, sur la maturité des solutions :

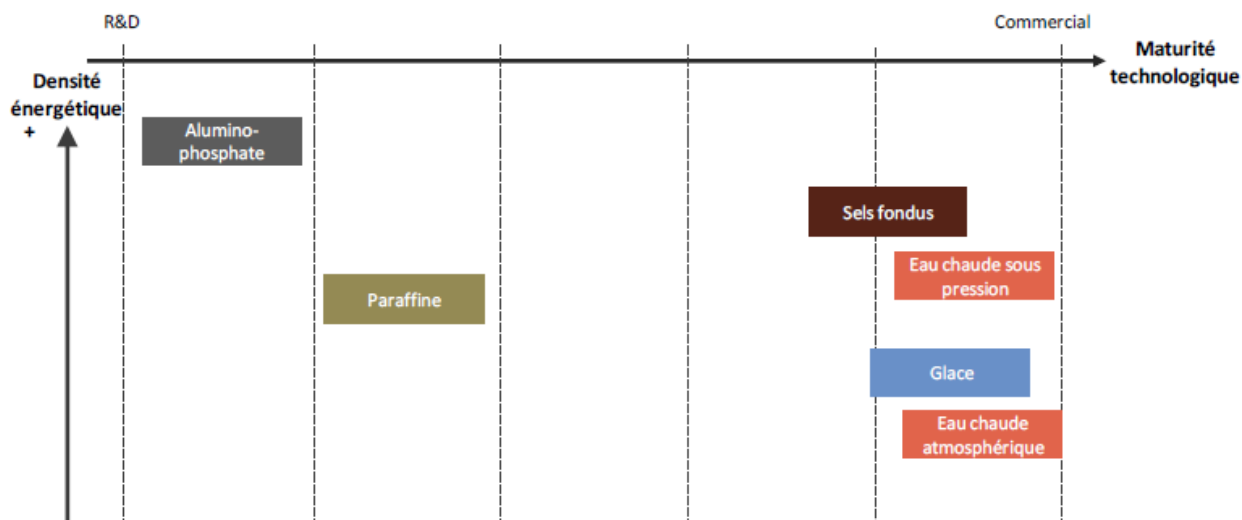


Figure 113 - Niveau de maturité technologique des moyens de stockage thermique

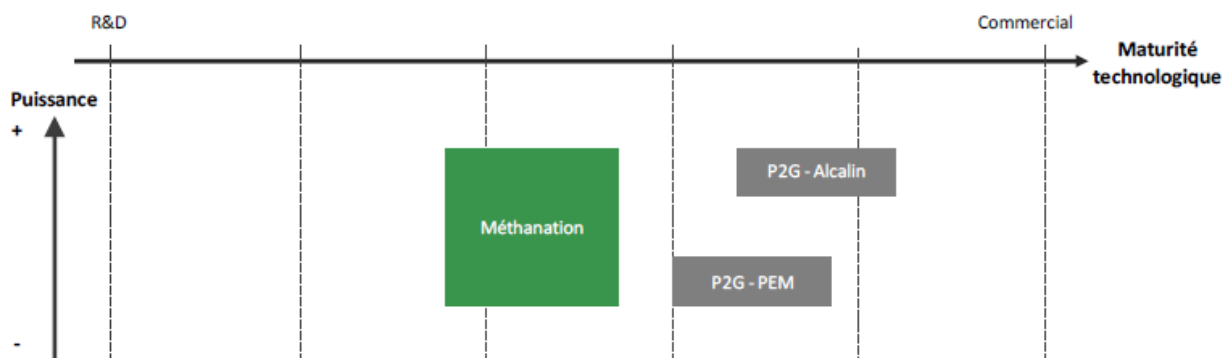


Figure 111 - Niveau de maturité technologique des systèmes Power To Gas

Source, étude sur le potentiel du stockage d'énergies (PEPS) ADEME, octobre 2013

Et sur les coûts (prédominants) associés à l'énergie dans des systèmes de stockage thermique :

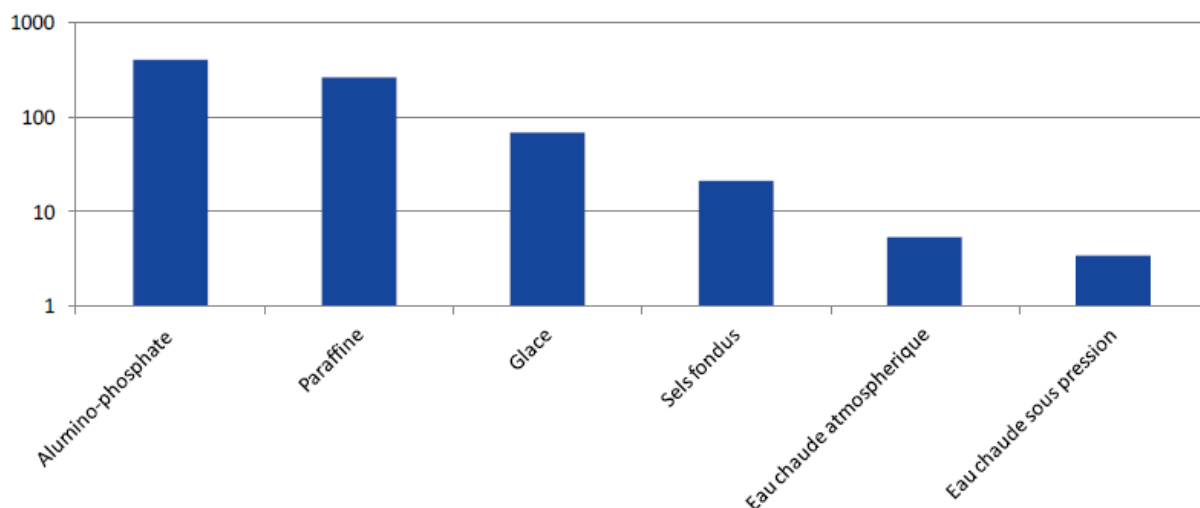


Figure 114 - Comparaison de la part énergie des CAPEX (€/kWh_{cap}) des solutions de stockage thermique en 2013. Pour les stockages d'eau chaude, les valeurs affichées sont valables pour des volumes conséquents (de l'ordre de 1000 m³)

Source, étude sur le potentiel du stockage d'énergies (PEPS) ADEME, octobre 2013

Ainsi que sur les coûts des systèmes de type « power to gas » :

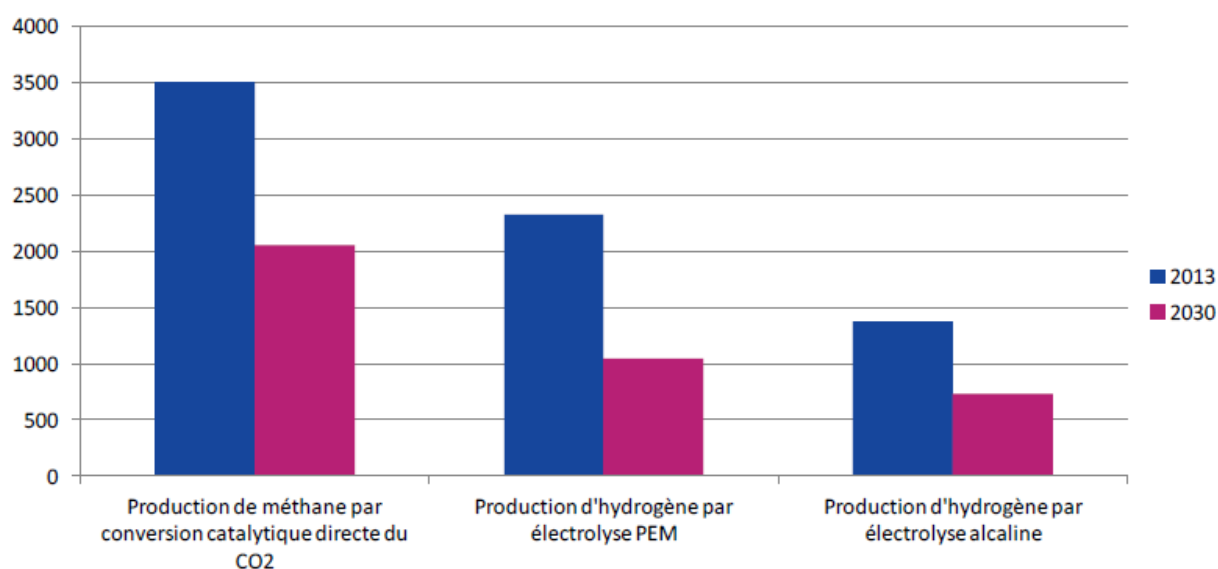


Figure 112- Comparaison des coûts des CAPEX (€/kWe) des solutions de Power To Gas en 2013 et 2030

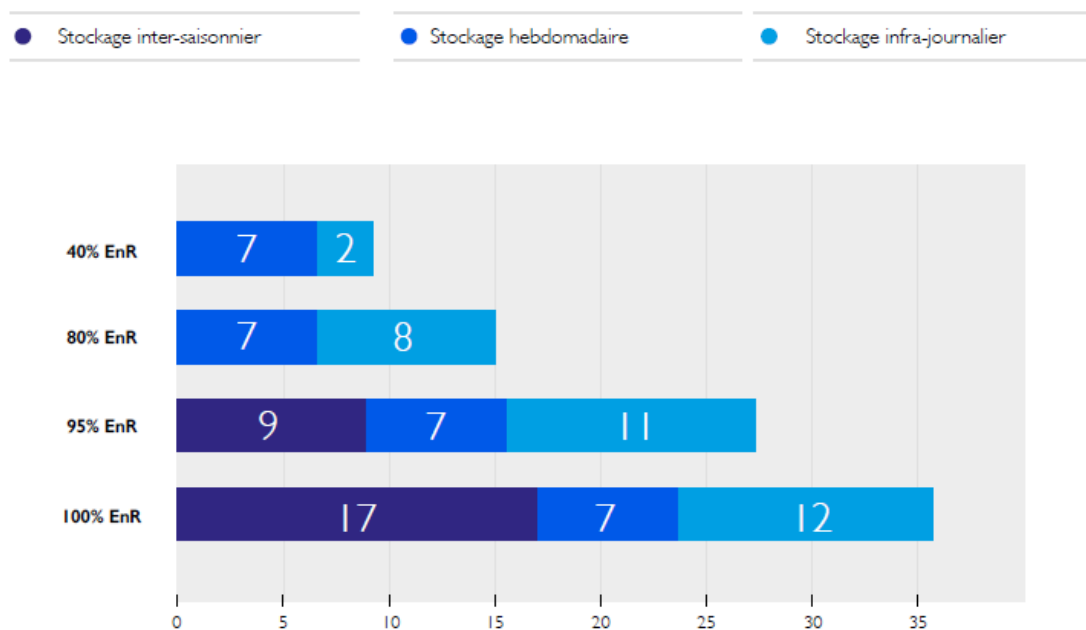
Source, étude sur le potentiel du stockage d'énergies (PEPS) ADEME, octobre 2013

Ces éléments sont indicatifs.

4.4.3.2. Le stockage de l'énergie : des besoins encore faibles mais croissants, à expertiser

Dans le rapport sur un mix 100 % renouvelable, l'ADEME détaille les puissances de stockage nécessaires en fonction du taux de pénétration des énergies renouvelables dans le système de production :

Stockage installé (GW) en fonction du taux d'EnR



Source : un mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations », synthèse, ADEME, octobre 2015

Ainsi, à l'horizon 2030 où la part d'électricité renouvelable est selon la LTECV tenue d'atteindre 40 %, les besoins en stockage seraient de 2 GW de stockage court terme (infra-journalier) et 7 GW en stockage hebdomadaire. De telles données demandent à être confirmées et supposent un réseau centralisé et se préoccupe essentiellement de l'équilibre entre offre et demande, avec le réseau en intermédiaire.

La problématique est différente si l'on se pose la question d'autonomie locale d'une installation ou d'un îlot énergétique. Le développement de l'autoconsommation/autoproduction soulève d'autres sujets, comme le modèle de rémunération des réseaux, actuellement assis sur énergie consommée et puissance souscrite, et plus tard peut-être assis sur le service de connexion au réseau et/ou les pertes en ligne évitées en cas d'autoconsommation,

4.4.3.3. La capture et séquestration du carbone (CSC) : une technologie encore immature mais nécessaire à divers scénarios

La CSC est une technologie d'ajustement d'un certain nombre de scénarios, qui sans elle ne bouclent pas. Les ambitions françaises à l'horizon 2050 en matière de décarbonation de l'industrie de l'énergie y font appel.

Le captage et la séquestration du CO₂ ouvrent des espoirs, et des prototypes fonctionnent dans le monde⁶³ (Projet canadien de captage « Boundary dam » de captation de 1Mt CO₂/an, sur une centrale thermique au charbon depuis octobre 2014 ; récupération du CO₂ extrait de gaz naturel en aquifère salin à Sleipner, Snøhvit en Norvège, In-Salah en Algérie ; utilisation pour la récupération assistée d'hydrocarbures à Weyburn-Midale au Canada, Cranfield aux U.S.A., ...) voire en France (notamment à Lacq, en Aquitaine) ou sont en projet (projet américain « ADM Illinois industrial carbon capture and project » de captage de 1Mt CO₂/an, sur un site de production d'éthanol).

Il y a là un enjeu industriel considérable pour les entreprises françaises. Selon le 5^e rapport du GIEC⁶⁴ le principal débouché de la CSC est le secteur électrique. Des coûts indicatifs⁶⁵ sont de 40 à 80 US\$2002/t CO₂ tout compris pour séquestration de CO₂ liquide dans les océans. La feuille de route européenne Energy Roadmap 2050 prévoit 11 GW de production d'énergie avec CCS en 2030 et 100 GW en 2050 pour respectivement 18-36 Md€ et 160-320 Md€. La CSC serait compétitive dans les centrales à charbon à partir d'un prix du carbone de 35-60€/tCO₂, et dans les centrales à gaz naturel à partir de 90-105€/tCO₂. En France, selon GDF, les coûts sont de 43-90€/tCO₂, décomposés en 40-60€/tCO₂ pour la capture, 2-20€/tCO₂ pour le transport et 0,5-10€/tCO₂ pour le stockage. Le surcoût serait de 30 à 40 % de l'électricité produite, l'investissement requérant une taxation carbone supérieure à 40€/tCO₂.

Mais le nombre et la diversité des problèmes à résoudre créent autant d'incertitudes sur la perspective d'un développement à grande échelle (la fourchette d'estimations du GIEC pour la CSC au niveau mondial à 2050 reflète ces incertitudes : « 15 à 55 % »). Parmi ces problèmes on peut citer la validation et l'amélioration des technologies

⁶³ Une base de données complète est accessible sur <https://sequestration.mit.edu/tools/projects/index.html>

⁶⁴ Climate change 2013, the physical science basis, 5e rapport du GIEC, 2013 : <http://ipcc.ch/report/ar5/wg1/>

⁶⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9questration_du_dioxyde_de_carbone

existantes, l'amélioration du rendement énergétique des procédés, la réduction des coûts d'investissement et de fonctionnement, notamment la dépense énergétique, l'intégration aux infrastructures industrielles existantes, la disponibilité des capacités de stockage, la faisabilité et la sécurité à long terme des systèmes de stockage. La redoutable question de l'acceptabilité sociale des stockages souterrains n'est notamment pas encore réellement abordée⁶⁶, de sorte qu'aucune prévision étayée de développement significatif ne semble possible aujourd'hui pour l'Europe et la France.

En France, les perspectives de la CSC sont principalement industrielles, y compris et notamment le secteur de la production d'énergie : selon la SNBC⁶⁷ les objectifs à 2050 par rapport à 1990 en matière de décarbonation de l'industrie chimique, et aussi de l'industrie en général, sont de -85 %, et ceux du secteur de la production d'énergie sont de -96 %, ce qui représenterait idéalement 163 MtCO₂⁶⁸; selon d'autres documents en 2050 le potentiel est de 80 MtCO₂/an (moitié moins), avec réduction d'un tiers ou de moitié des émissions des installations concernées.⁶⁹ Enfin le scénario ANCRE SOB (qui est une inspiration du scénario SOB du DNTE) explore seul la CSC à partir de 2040⁷⁰ et compte sur un stockage de 40 MtCO₂/an (moitié moins encore que l'estimation précédente) pour atteindre l'objectif du facteur 4⁷¹.

Ainsi le CSC représente dans les scénarios précités à gros traits entre 1/12 et 1/3 du potentiel de réduction des émissions de GES globales françaises (métropole) en 2050 par rapport à 1990⁷². C'est une hypothèse au mieux significative, au pire structurante.

4.5. Aspects transverses - l' « énergie 2.0 »

En 2016 comme en 2013, l'ensemble des développements technologiques en cours laisse entrevoir à échéance décennale l'apparition d'un modèle intégré décarboné fondé sur la combinaison intelligente de production décentralisée d'énergie décarbonée (photovoltaïque au sol sur friches foncières, éolien là où acceptable, photovoltaïque intégré au bâti là où rentable) ; de capacités de stockage pour faire face à l'augmentation de la production intermittente d'énergies renouvelables et aussi dans les batteries des véhicules électriques⁷³ ou, sans doute plus tard, dans des réserves d'hydrogène ; des « réseaux intelligents » (« smart grids » en anglais) permettant de gérer l'offre décentralisée, la demande, l'effacement et la mutualisation à l'échelon local d'abord, réduisant d'autant les besoins d'interconnexion à longue distance

⁶⁶ Par analogie avec d'autres projets de cette échelle, on peut penser que 10 ans représentent un temps relativement court pour concevoir et faire aboutir un projet de stockage souterrain sur un site donné.

⁶⁷ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>,
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

⁶⁸ En 1990 production d'énergie et industrie émettent respectivement 78 et 148 MtCO₂eq selon la SNBC, mais les seules émissions de CO₂ sont de 69 et 114 MtCO₂ selon le rapport SECTEN http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/secten_avril2015_sec.pdf ; des réductions de respectivement -96 % et -85 % des émissions de seul CO₂ par CSC aboutissent à un potentiel total de 163 MtCO₂.

⁶⁹ Source : document préparatoire à la stratégie nationale de la recherche énergétique (SNRE), avril 2016

⁷⁰ http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

⁷¹ Source : document préparatoire à la stratégie nationale de la recherche énergétique (SNRE), avril 2016

⁷² Émissions métropolitaines de GES de 552 MtCO₂eq en 1990 selon la SNBC

⁷³ Où nombre de brevets de base sont l'œuvre de scientifiques français.

coûteux en réseaux et en pertes et les déstabilisations du réseau global; et une évolution des structures de gestion vers une décentralisation des décisions.

Les conditions économiques pour le déploiement de ces modèles ne sont pas encore réunies. De premières expériences ont cependant été conduites en France.

4.5.1. Réseaux intelligents

Au niveau local le projet de réseau intelligent IssyGrid⁷⁴ (2 quartiers, 2 000 logements, 160 000 m² de bureaux, 2 M€), a été démarré en 2012 et a été opérationnel en 2013. On peut aussi mentionner une expérience de « smart grid » à Toulouse, premier réseau intelligent à l'échelle d'une zone d'activités économiques. Enfin, le démonstrateur Greenlys⁷⁵ associe l'ensemble des acteurs français de l'énergie électrique dans une première expérimentation globale de smart grid menée sur plusieurs milliers de foyers avec intégration d'EnR à Lyon et Grenoble, pour un coût de 43M€ sur 2012-2016.

4.5.2. Territoires à énergie positive pour la croissance verte

Plus récemment le déploiement des « territoires à énergie positive pour la croissance verte » (TEPCV), participe et contribue à cette tendance à la décentralisation de systèmes énergétiques. *« Un TEPCV est un territoire d'excellence de la transition énergétique et écologique : sélectionnée à la suite d'un appel à projets, la collectivité lauréate¹ s'engage en proposant un programme d'actions. Les thèmes sont :*

- *la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments ;*
- *la diminution des émissions de gaz à effet de serre dans les transports ;*
- *une gestion plus durable des déchets ;*
- *le développement des énergies renouvelables ;*
- *la préservation de la biodiversité ;*
- *l'éducation à l'environnement et la participation citoyenne.*

En pratique, l'essentiel des projets soutenus a porté sur la rénovation énergétique, la mobilité électrique et les éclairages publics.

La vocation des TEPCV est d'inciter les territoires à être force de propositions ; par leur exemple et leurs projets, ils permettent aussi une prise de conscience de la nécessité de la transition énergétique par des acteurs qui ne se sentaient pas encore concernés.

À la demande de la ministre, les TEPCV ont été conçus concomitamment à la préparation de la loi sur la transition énergétique de manière à incarner, sans attendre, la mobilisation du pays et de ses territoires aux enjeux de la transition énergétique et montrer aux citoyens des réalisations concrètes qui s'y rattachent.

⁷⁴ <http://issygrid.com>

⁷⁵ <http://www.tenerrdis.fr/Gestion-des-reseaux-et-Stockage-electriques/greenlys.html>

Le premier appel à projets de 2014 a permis de retenir 212 projets parmi 500 candidatures et 163 projets « en devenir » (c'est-à-dire encore insuffisamment aboutis).

Chaque lauréat de l'appel à projet bénéficie d'une dotation de 500 000 euros (pouvant aller jusqu'à 2 millions suivant les actions complémentaires mises en œuvre par la suite) et ce, indépendamment de la taille du territoire concerné. Le taux de subvention visé peut aller jusqu'à 80 % du financement d'une action (40 % de la subvention sont versés à la signature de la convention - 40 % lorsque l'avancement des projets le justifie - 20 % à la fin).

Suite au premier appel à projet, un deuxième a été lancé concernant les territoires en devenir.

Une troisième vague est en cours concernant une centaine de territoires déjà engagés dans des démarches de développement durable identifiés par les services déconcentrés, voire des parlementaires.

Une quatrième vague de contractualisation – labellisation est prévue suite à l'annonce par le Président de la République d'une augmentation de la ressource financière alimentant les contrats. On s'achemine ainsi vers 500 TEPCV impliquant environ 2000 collectivités territoriales.

On compte aujourd'hui (juin 2016) 356 territoires sous contrat représentant 1200 collectivités « acteurs », soit environ la moitié du territoire national et la moitié de la population française.

Le programme des TEPCV bénéficie actuellement d'une enveloppe spéciale transition énergétique d'un montant annuel de 250M€ pendant 3 ans (2015 à 2017), géré pour le compte de l'État par une convention de mandat donnée à la Caisse des Dépôts et Consignation (CDC). L'ordonnateur secondaire est la Ministre. En termes de dotation, c'est l'un des principaux programmes d'intervention de l'État.

À l'heure actuelle, 245M€ sont engagés pour un montant de 40M€ de crédits de paiement.

(...) Si l'appel à projets a eu le mérite d'inciter les territoires à être force de propositions, il a suscité cependant plusieurs objections dont la principale est l'effet d'aubaine qu'a pu représenter le versement d'une dotation pour des actions que des territoires comptaient de toute façon lancer. Cet effet d'aubaine est estimé à au moins ¼.

À noter enfin qu'une des préoccupations majeure pour la réussite du programme TEPCV est de mener à bien l'accompagnement et l'animation des territoires avec l'idée de mettre en place, à l'échelle des régions, des systèmes d'animation collective et d'accompagnement individuel des TEPCV (réflexions menées notamment par l'ADEME et le CEREMA). »⁷⁶

Ce dispositif des TEPCV est à l'heure de rédaction du présent rapport (2016) en cours d'évaluation. Il s'agit d'un dispositif hors norme, avec une composante forte de mobilisation et de communication, à des fins de démonstration et d'amorce de démarches vertueuses au sens de la transition énergétique.

⁷⁶ CR du collège énergie et climat du CGEDD, 6 octobre 2016, suite à une présentation des TEPCV par la mission d'appui national aux TEPCV.

4.5.3. Compteurs communicants

Le déploiement des compteurs « intelligents » Linky (35 millions de compteurs déployés sur 2015-2021) et Gazpar (11 millions de compteurs déployés sur 2017-2022) est un autre exemple de telles expériences, cette fois-ci au niveau global, pour mise en place d'un réseau plus « intelligent ».

Outre des débats sur la sécurité électromagnétique de ces déploiements, se posent des questions compliquées d'acquisition, de protection, de droits d'accès et de diffusion de données personnelles des consommateurs.

4.5.4. Énergie centralisée ou décentralisée

Une publication de janvier 2017 de France Stratégie « Énergie centralisée ou décentralisée ? »⁷⁷ présente différentes options pour un système énergétique futur : soit le maintien du système centralisée actuel, soit un système totalement décentralisé, soit un modèle hybride.

Un système centralisé correspond à la situation présente garantissant sécurité et égalité, mais le déploiement des EnR y introduit des contraintes supplémentaires en termes de renforcement et gestion du réseau (smart grids). De plus la sécurité d'approvisionnement requiert une base nucléaire, ou thermique couplée à des installations de CSC (capture et séquestration du carbone) si elles sont rentables.

Un système purement décentralisé avec des systèmes régis par des villes, quartiers ou associations via des boucles locales répond à une demande sociétale et au développement de l'autoproduction et autoconsommation, instaure de nouvelles solidarités entre métropoles et territoires environnant au détriment de solidarités nationales plus globales. Selon l'étude un tel système suppose, pour garantir l'approvisionnement, la maîtrise du stockage intersaisonnier ; en effet les besoins sont concentrés en hiver (chauffage) et la production solaire en été. Cette analyse néglige cependant la production éolienne, plus importante en hiver qu'en été et plus importante la nuit que le jour, au rebours de la simulation de l'ADEME 100 % énergies renouvelables par exemple qui elle compte essentiellement sur l'éolien. De plus le système ainsi conçu rend moins utile le réseau centralisé qui se borne à connecter les micro-réseaux, et requiert, en raison de l'intermittence des ressources, une forte flexibilité des réseaux locaux avec pilotage intelligent, échanges, stockage, effacement, pas des systèmes d'information dédiés.

Un système intermédiaire combinant décentralisation et assurance par le réseau au moyen de microréseaux de taille diverse raccordés au réseau serait intéressant, accommode le développement de l'autoconsommation et de l'autoproduction, mais suppose des investissements potentiellement redondants (avec une robustesse accrue cependant) et pose des problèmes de tarification afin que la charge des investissements soient également réparties : le problème est d'éviter les passagers clandestins qui utilisent peu (mais tout de même parfois à des fins d'assurance) le réseau centralisé et reportent son coût sur ceux qui ne peuvent s'en passer. Des tarifs reflétant les coûts pourraient alors être rattachés à la puissance mise à disposition (kW) plutôt que l'énergie réellement consommée (kWh).

⁷⁷ <http://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/17-27-actions-critiques-energie-web-ok.pdf>

En tout état de cause, l'émergence de nouveaux systèmes d'énergie décentralisés pose des questions et problèmes techniques, économiques, financiers, tarifaires, de sécurité, de solidarité, sociétaux qu'il convient d'analyser finement.

4.5.5. Retour sur le rapport de 2013

Le rapport de 2013 recommandait de « *faire des paris, notamment à l'occasion de la réflexion sur les normes de construction pour 2020, sur les développements de «l'énergie 2.0», et en tout cas laisser ouvertes les possibilités de déploiement de ces systèmes* ».

La stratégie publique de progression vers le facteur 4, dans un contexte de fluctuations importantes des coûts et d'incertitudes multifactorielles, implique qu'on étudie et qu'on tienne prêtes des mesures pour les temps de pénurie (réglementations, systèmes de quotas intelligents, par exemple) et des mesures pour les temps de détente (la taxation modulée du CO₂, permettant de lisser la hausse tendancielle des prix de l'énergie, par exemple).

Le rapport de 2013 recommandait d'« *éviter une baisse des prix à la consommation dans le cas où l'arrivée des hydrocarbures non conventionnels réduiraient temporairement la pression sur les coûts d'approvisionnement, par exemple grâce à une modulation dans le temps de la taxation* ».

Cette recommandation, exacte réplique de l'idée de la TIPP flottante, reste actuelle. Clairement elle n'a pas été mise en œuvre, pour des raisons politiques et sociales notamment.

5. Synthèse pour le secteur de la production d'énergie

D'une manière générale, une diminution sensible des émissions de gaz à effet de serre passe, parallèlement à des efforts dans le secteur agricole et la gestion des terres, par :

- des économies d'énergie ;
- des énergies aussi peu carbonées que possible, conduisant à un développement de l'usage de l'électricité produite sans émissions de CO₂, de la biomasse, des biocarburants et du biogaz.
- le développement des énergies renouvelables et le maintien du recours au nucléaire dans une proportion variable pour produire l'électricité, ce qui, compte tenu des phénomènes d'intermittence dans la production d'électricité par les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, amène à développer le stockage et la gestion des pointes.

L'enjeu du secteur de la production d'énergie est, au-delà de la diminution des émissions lors de la production d'énergie, la production d'énergies décarbonées à un coût raisonnable.

5.1. Importance de l'efficacité et de la sobriété énergétique

Il faut sans doute s'interroger sur les moyens de piloter une telle évolution. Le recours à des instruments économiques liés au prix du carbone est souhaitable, dans un contexte européen lorsque les secteurs impactés sont en situation de concurrence. Le soutien à la recherche et à la mise en place de démonstrateurs l'est également. Au-delà de ces deux initiatives, on peut se demander s'il ne faudrait pas avoir une politique plus ambitieuse et plus suivie en matière d'économies d'énergies dans des secteurs comme les bâtiments et les transports. Il est frappant de constater que les scénarios raisonnent consommation énergétique et type d'énergie avant d'en déduire des émissions de GES. Peut-on dès lors effectivement piloter en faisant l'économie d'objectifs d'économie d'énergie et de type d'énergie en s'en remettant uniquement à un prix du carbone ? Probablement pas. De fait, les objectifs chiffrés de la LTECV n'ignorent pas cette problématique de l'efficacité énergétique puisqu'ils visent une réduction de moitié de la consommation d'énergie finale en 2050 par rapport à 2012⁷⁸.

Ce constat milite aussi pour le développement d'une culture et d'une pratique de sobriété énergétique dans tous les secteurs d'activité : de telles recommandations sont aussi vieilles que le premier choc pétrolier, et restent actuelles. Elles semblent victimes d'un classique effet rebond, dans lequel les gains d'efficacité et économies sont immédiatement annulés par le développement de nouveaux usages qui se substituent au moins partiellement aux anciens, par exemple la croissance de la part de l'électricité spécifique et des technologies de l'information dans les bâtiments, l'informatisation, le confort et la connexion des véhicules, etc. Pour éviter de tels effets rebonds, la tarification de l'énergie est un des instruments possibles, tout comme la réglementation.

⁷⁸ La consommation d'énergie finale en 2012, corrigée des variations saisonnières, est de 167 Mtep (chiffres clé de l'énergie, édition 2014). Si l'on s'intéresse à d'autres dates de référence, cette consommation était selon la même source de 175 Mtep en 2005 et 153,1 Mtep en 1990.

5.2. De fortes ambitions à long terme dans le secteur de l'énergie, tirées par des technologies encore à développer

Si l'on se focalise sur les émissions de GES du secteur de production d'énergie, le secteur de la production d'énergie est crédité d'un potentiel de réduction très considérable par certains scénarios volontaires (facteur 23 selon la vision prospective 2030-2050 de l'ADEME ; facteur 20 selon le comité trajectoire alias rapport de Perthuis) qui en fin de compte alimentent la stratégie nationale bas carbone. Elle table, à l'horizon 2050 et par rapport à 1990, sur une division par 2 de la consommation énergétique, une multiplication par deux de l'efficacité énergétique, et une décarbonation radicale du mix énergétique avec l'aide des techniques de capture et séquestration du carbone.

Il y a là un effet de report d'efforts considérables au-delà de l'horizon de la stratégie, efforts alimentés par des technologies encore peu matures d'un point de vue technique, économique, environnemental et sociétal.

Ce constat milite pour un effort accru afin de permettre l'émergence dans de bonnes conditions de ces technologies nécessaires.

5.3. Un contexte de mix énergétique non encore stabilisé

Ce constat est de plus fait dans un contexte de faible visibilité de l'avenir de la place du nucléaire dans le mix énergétique national. La PPE apporte peu d'éléments en faisant du nucléaire une variable d'ajustement, même si la LTECV prévoit une part de 50 % du nucléaire dans la production électrique nationale à l'horizon 2025. À court terme, comment peut-on utiliser au mieux l'outil existant en prenant en compte les nouvelles exigences de sécurité ? À long terme, quelle est la place du nucléaire par rapport aux énergies renouvelables en tenant compte des contraintes d'espace, de prix, d'acceptation et de sécurité ?

5.4. Des efforts demandés réduits à court et moyen terme qui ne doivent pas empêcher des mesures sans regret

En revanche, après passage des émissions du secteur de 78 MtCO₂éq en 1990 à 57 MtCO₂éq en 2013, un effort minimal est demandé par la SNBC au secteur énergétique sur ces trois premières périodes de budget carbone, jusqu'à 2028 donc. Quelques stratégies pourraient sans doute être implantées sans regret :

Sur la production de chaleur distribuée par les réseaux, n'y a-t-il pas d'ores et déjà un intérêt économique à remplacer le charbon par la biomasse ?

Sur la production d'électricité, n'a-t-on pas intérêt à chercher au maximum à diminuer la pointe via diverses mesures comme une tarification adéquate de l'électricité, et/ou des dispositifs d'effacement sur des réseaux intelligents recourant le cas échéant au stockage ?

5.5. Une distribution centralisée susceptible d'évoluer

La mission est consciente que les projections relatives au secteur de la production énergétique sont faites dans une hypothèse relativement centralisée de distribution énergétique. L'émergence d'îlots voire territoires autoconsommateurs est un sujet

moins documenté. Il existe depuis peu des offres en ce sens, et l'émergence de territoires à énergie positive anticipe ce développement, même si les TEPCV à ce stade semblent encore peu répondre à leur définition.

Recommandations du rapport 2013 concernant le secteur de la production d'énergie

26. Développer la recherche sur les élasticités de la consommation d'énergie à l'offre, à court et à long terme, par secteur, etc.

Les données en la matière existent mais sont parcellaires et l'offre est en pleine évolution, la recherche additionnelle reste donc utile.

27. Entreprendre une action pédagogique étendue, à la fois d'écoute et d'explication sur l'énergie éolienne terrestre.

Il y a eu beaucoup de communication sur l'éolien terrestre mais les oppositions perdurent, notamment lorsque l'implantation est proche de chez soi. La recommandation, au vu des ambitions nationales en matière de développement de l'éolien terrestre, reste pertinente. Le financement participatif de ces installations est un moyen d'impliquer les habitants dans leur réalisation.

28. Encourager dès maintenant « sans modération » la récupération de chaleur, l'hydraulique, l'utilisation de la biomasse non valorisable, l'énergie éolienne.

La recommandation, qui prend en compte tant l'énergie électrique que l'énergie thermique souvent oubliée, reste valable, notamment en raison du retard pris en matière de développement des énergies renouvelables en France vis-à-vis des objectifs, malgré une forte croissance et des conditions économiques (soutien, évolution des coûts et performance) parfois très favorables.

29. Faire des paris, notamment à l'occasion de la réflexion sur les normes de construction pour 2020, sur les développements de « l'énergie 2.0 » et en tout cas laisser ouvertes les possibilités de déploiement de ces systèmes.

Des réflexions sont en cours à ce sujet⁷⁹, par exemple au sein du plan bâtiment durable dans la perspective des nouvelles réglementations, ou au sein de la DGECE sur l'autoproduction et l'autoconsommation, et plus généralement sur la question de la stabilité des réseaux. Le sujet dépasse d'ailleurs le secteur du bâtiment. La problématique du véhicule électrique et de l'exigence en termes de pics de puissance requis par la charge d'un parc conséquent (mais aussi des bénéfices du recours aux

⁷⁹ Pour mémoire, l'expression « énergie 2.0 » renvoie à un nouveau modèle du secteur de l'énergie, intégrant production, consommation et décision décentralisée, stockage de l'énergie, réseaux intelligents, et de manière générale convergence avec et recours important aux technologies de l'information et de la communication

batteries de ce parc pour stabiliser le réseau), ou la disponibilité de points de charge chez soi et au bureau, en est un exemple. Les appels à projet « territoires à énergie positive pour la croissance verte », le déploiement des compteurs intelligents ou des réseaux intelligents peuvent constituer des expérimentations instructives. La recommandation reste d'actualité.

3. Éviter une baisse des prix à la consommation dans le cas où l'arrivée des hydrocarbures non conventionnels réduiraient temporairement la pression sur les coûts d'approvisionnement, par exemple grâce à une modulation dans le temps de la taxation.

Ces recommandations (2 et 3), et notamment la seconde (recommandation 3) n'ont pas été suivies dans le contexte actuel (depuis mi-2014 à mi-2016) de bas prix des hydrocarbures. En tout état de cause, une telle TIPP flottante inversée est difficile à mettre en œuvre, pour des raisons politiques, sociales, etc. Elle supposerait une possibilité donnée au gouvernement d'agir rapidement compte-tenu de la volatilité des prix, et probablement une utilisation consensuelle des sommes ainsi collectées. La programmation à moyen terme de la taxe est une bonne chose, mais il manque encore un pilotage de la fiscalité carbone réactif aux fluctuations du marché.



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

Annexe thématique sur l'industrie (hors secteur de production d'énergie)

Rapport n° 008378-02
établi par

Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF (coordonnateur), Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT

Février 2017



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités
passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction
de ce rapport.

Sommaire

1. L'industrie: un cinquième des émissions nationales, en décroissance.....	3
1.1. Statistiques les plus récentes.....	3
1.2. Évolutions récentes.....	3
1.3. Examen par branches émettrices : des progrès significatifs couplés à un effet sensible de la baisse de production industrielle.....	5
1.4. Les émissions du secteur des déchets sont principalement dues à la mise en décharge.....	8
1.5. Un rythme de réduction soutenu mais encore sans doute insuffisant.....	9
2. Quelques exercices de prospective antérieurs à 2013 pointent vers un potentiel de division significatif des émissions industrielles entre 1990 et 2050	10
2.1. Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030 – juillet 2011.....	10
2.2. Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone – octobre 2011.....	12
2.3. Négawatt – septembre 2011 actualisé juillet 2013.....	13
3. Évolutions récentes : nouveaux scénarios et nouvelles politiques.....	16
3.1. Vision 2030-2050 de l'ADEME – juin 2013.....	16
3.2. Les trajectoires énergétiques du DNTE – juillet 2013.....	19
3.3. Le projet DPPP – septembre 2015.....	22
3.4. Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, rapport 2013 – janvier 2014 et le rapport ANCRE sur les « decarbonization wedges » - novembre 2015.....	23
3.5. La SNBC – novembre 2015.....	24
3.6. Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 – septembre 2015.....	27
3.7. Récapitulatif des scénarios post 2013 pour l'industrie.....	30
3.8. Récapitulatif des scénarios post 2013 pour les déchets.....	31
4. Aspects économiques, problèmes et solutions.....	33
4.1. Un secteur assujéti à un système de quotas d'émissions encore peu efficace en raison de surallocations.....	33
4.1.1. Le système EU ETS couvre la moitié des émissions de CO2 de l'UE.....	33
4.1.2. Le débat sur la valeur du carbone.....	34
4.2. Trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût – juin 2016.....	35
5. Les initiatives des industriels – une mobilisation mondiale.....	39
6. Zoom sur quatre branches clés et parangonnage avec l'industrie britannique.....	40
6.1. Branche chimie.....	40
6.2. Branche minéraux non métalliques et matériaux de construction.....	42
6.3. Branche production de métaux ferreux.....	44
6.4. Industries agro-alimentaires.....	46

6.5. Conclusion du parangonnage – des potentiels de réduction très différents selon les hypothèses prises, un tendanciel prometteur mais sans doute encore insuffisant en l'absence de technologies de rupture.....	48
7. Synthèse pour le secteur de l'industrie.....	49
7.1. Un potentiel de réduction variable mais parfois considérable, notamment en cas de capture et stockage du carbone / CSC.....	49
7.2. Utilité d'un prix du carbone et du mécanisme européen de transfert ETS.....	49
7.3. Privilégier les réductions d'émission rapportées à la production.....	50
7.4. Utilité d'une approche par branche.....	50
7.5. Rôle décisif des technologies de rupture.....	50
Recommandation du rapport 2013 concernant le secteur de l'industrie.....	51

1. L'industrie: un cinquième des émissions nationales, en décroissance

La consommation d'énergie finale en France est constituée à 70 % d'énergies fossiles, et le secteur de l'industrie est assez représentatif de cette tendance globale.

Il convient de distinguer les émissions hors utilisation de l'énergie des émissions incluant l'utilisation de l'énergie. Ces dernières sont a priori les plus pertinentes, l'utilisation de l'énergie représentant 74 % de toutes les émissions françaises hors UTCF, et devant donc être ventilée dans les différents secteurs pour représenter leur importance réelle en termes d'émissions.

1.1. Statistiques les plus récentes

En 2014, le secteur de l'industrie manufacturière et des déchets en France métropolitaine (périmètre dit « SECTEN ») représentait 102 MtCO₂eq soit 22,8% du total des émissions métropolitaines hors UTCF (446 MtCO₂eq) et 26% du total des émissions métropolitaines avec UTCF (392 MtCO₂eq).¹

Les estimations pour 2015 (102 MtCO₂eq, identique à 2014) donnent pour l'industrie manufacturière et les déchets un poids de 22,3 % (resp. 25,4%) des émissions métropolitaines hors UTCF (respectivement avec UTCF).

L'industrie manufacturière hors déchets en France y compris l'outre-mer (« périmètre dit CCNUCC) représentait par contre, en 2014, 85 MtCO₂eq soit 18,5 % du total des émissions françaises hors UTCF se montant à 458,9 MtCO₂eq (resp. 20,8% des 408,3 MtCO₂eq d'émissions françaises y compris UTCF).

Si l'on inclut le secteur des déchets² (19,5 MtCO₂eq émis en 2014) dans l'industrie manufacturière, alors cette dernière représente 22,8 % des émissions France et outre-mer hors UTCF et 25,6 % des émissions prenant en compte l'UTCF.

1.2. Évolutions récentes

Entre 1990 et 2014, le secteur de l'industrie manufacturière et des déchets en France métropolitaine a réduit ses émissions de 164,1 à 101,9 Mt CO₂ eq³. Dans ce secteur hétérogène, les réductions sont principalement obtenues par les sous-secteurs de la chimie (53,8 Mt CO₂ eq en 1990, 23,2 Mt CO₂ eq en 2014⁴), des métallurgies ferreuses (27,4 à 18,7) et non ferreuses (7,5 à 1,7), des minéraux non-métalliques, matériaux de construction (29,9 à 18,7) et du papier-carton (4,9 à 2,7). Les émissions

¹ Source : Citepa, rapport Secten 2016, http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten#Evolution_emi_gd_secteurs

² Hors incinération avec récupération d'énergie, comptabilisée dans la production d'énergie, mais qui ne représente qu'une petite partie des émissions liées aux déchets, l'essentiel de ces émissions étant liée à la mise en décharge

³ Source : Rapport SECTEN 2016, réalisé par le CITEPA. Les chiffres du chapitre 1 sont tirés des tableaux récapitulatifs dont des extraits sont joints, téléchargeables à l'adresse <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>. Le format SECTEN ne couvre que la France métropolitaine. D'autres formats existent (CCNUCC, Kyoto, Plan Climat) qui couvrent la France y compris les DOM TOM. La distinction doit être faite, même si en pratique les différences sont faibles.

de la construction passent de 3,6 à 2,8 avec un pic au début des années 2000, le traitement des déchets passe de 16,5 à 17,6 après un pic dans la décennie 2000-2009. La plupart de ces gros émetteurs sont dans le périmètre du SCEQE (système communautaire d'échange de quotas d'émission).

PRG		EMISSIONS DANS L'AIR EN FRANCE METROPOLITAINE															
Source CITEPA / format SECTEN - avril 2016		secten_90-xx-d.xlsx															
Mt CO ₂ e = 10 ⁴ t CO ₂ e	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Chimie	53,8	52,0	39,8	38,1	34,6	36,0	32,8	34,5	33,4	33,0	31,2	28,8	27,3	26,2	25,4	23,2	23,2
CO ₂ biomasse hors bilan	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Construction	3,6	3,3	4,1	5,0	6,4	6,1	5,8	5,4	5,3	4,5	4,0	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,8
CO ₂ biomasse hors bilan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1
Biens d'équipements, matériels de transport	5,6	6,3	6,0	5,7	5,6	5,9	5,5	5,8	5,6	4,8	4,9	4,0	4,3	3,8	3,9	4,1	3,8
CO ₂ biomasse hors bilan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agro-alimentaire	9,1	10,7	10,8	9,1	8,8	9,3	8,8	10,3	10,9	11,1	10,3	9,8	11,0	10,5	10,7	10,0	8,9
CO ₂ biomasse hors bilan	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	1,3	1,6	1,6	1,7	1,8	0,6	0,5	0,7	0,5
Métallurgie des métaux ferreux	27,4	26,5	25,3	22,6	23,7	24,2	23,9	22,7	22,8	22,6	21,1	16,1	19,0	16,9	16,3	17,3	18,7
CO ₂ biomasse hors bilan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Métallurgie des métaux non-ferreux	7,5	5,9	5,9	5,0	5,8	5,1	4,0	3,6	3,2	2,9	2,4	1,9	2,0	1,8	2,0	2,0	1,7
CO ₂ biomasse hors bilan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
Minéraux non-métalliques, matériaux de construction	29,9	25,2	25,1	24,0	23,9	23,9	24,9	24,5	25,3	25,3	24,5	20,7	22,2	22,5	21,4	20,4	18,7
CO ₂ biomasse hors bilan	0,2	0,2	0,6	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	2,3	1,9	2,0	1,8
Papier, carton	4,9	5,4	5,8	4,6	4,4	5,0	4,7	4,4	4,4	4,1	3,3	3,0	3,1	2,7	2,8	3,0	2,7
CO ₂ biomasse hors bilan	5,2	5,6	3,9	4,0	4,2	4,7	4,4	4,7	4,6	4,7	4,7	3,6	3,8	4,4	4,2	4,0	4,2
Traitement des déchets	16,5	19,9	21,4	21,5	21,6	21,6	21,3	21,0	20,9	20,5	20,2	19,6	19,6	19,2	18,5	18,0	17,6
CO ₂ biomasse hors bilan	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Autres industries manufacturières	5,8	6,0	5,1	5,1	4,9	5,2	4,6	5,0	4,8	4,8	4,8	3,8	3,9	3,7	3,6	3,8	3,8
CO ₂ biomasse hors bilan	1,0	0,9	2,5	2,2	2,2	1,8	2,2	2,2	1,7	2,0	2,7	3,7	3,4	2,8	1,4	2,5	0,9
Bilan Industrie manufacturière (a)	164,1	161,1	149,2	140,6	139,7	142,3	136,3	137,3	136,5	133,6	126,8	111,0	115,5	110,5	107,4	104,7	101,9
CO₂ biomasse hors bilan (b)	6,7	7,0	7,3	7,3	7,5	7,7	7,8	8,1	8,5	9,2	10,0	9,9	10,0	10,2	8,2	9,2	7,5

(a) Bilan secteur net hors émissions CO₂ des énergies renouvelables, en particulier issues de la biomasse.

(b) CO₂ issu de la combustion de la biomasse, hors bilan CO₂ du secteur.

Émissions du secteur industriel en France métropolitaine - Source : Rapport Secten 2016 du CITEPA, <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>

On observe dans ces données métropolitaines que quatre branches spécifiquement industrielles - chimie, minéraux non métalliques, métallurgie des métaux ferreux et agro-alimentaire- représentent 82 % des émissions hors déchets, lesquels ne sont pas toujours inclus dans l'industrie manufacturière. La présente annexe examinera donc par la suite ces quatre secteurs de manière spécifique.

Les données précédentes concernent les données métropolitaines (format dit « SECTEN »). Il est possible d'examiner le périmètre plus large du format dit « CCNUCC » et/ou Kyoto (cohérents avec ceux de la SNBC, stratégie nationale bas carbone), incluant les DOM. Les conclusions et ordres de grandeurs restent semblables : entre 1990 et 2014, en France y compris les DOM, les émissions correspondant aux procédés industriels hors utilisation de l'énergie ont été réduites de plus de 50 %, passant de 61,4 MtCO₂eq en 1990 à 25 MtCO₂eq en 2014, soit un peu plus de 5 % des émissions totales hors UTCF de 458,9 MtCO₂eq. Cela correspond à un TCAM (taux de croissance annuel moyen) proche de -4 %.

⁴ http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/secten_avril2015_sec.pdf pour le rapport 2015 et <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten> pour des éléments sur le rapport 2016

Emissions de GES directs au format "Plan Climat" en France (périmètre KYOTO) (2)															
Source CITEPA/ inventaire CNUCC décembre 2015															
Secteurs	Cat. CRF	GES directs - Emissions en Mt CO ₂ e (1)													
		1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Evolution 90-2014
Industrie manufacturière		147,4	141,0	127,6	116,5	115,9	113,4	107,0	92,0	96,3	91,8	89,5	87,4	85,0	-42,4%
Combustion industrie manufac. et construc.	1A2	86,0	84,1	85,1	79,9	81,1	79,2	75,2	64,2	68,3	64,8	64,5	62,0	60,0	
Procédés industrie chimique	2B (p), 2D (p)	28,1	30,2	16,2	10,6	9,2	9,1	8,0	6,9	5,2	4,2	3,8	3,8	4,2	
Procédés produits minéraux	2A, 2D (p)	16,5	13,8	13,8	13,9	14,2	14,2	13,4	11,4	12,1	12,3	11,5	11,6	11,0	
Procédés production de métaux	2C	8,5	8,5	7,0	5,7	5,0	4,9	4,2	3,6	4,8	3,9	3,1	3,5	3,5	
Solvants et produits divers	2D (p), 2G (p)	1,3	1,1	1,1	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	
Production de gaz fluorés	2B (p)	5,7	1,1	1,2	1,2	1,1	0,7	0,7	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	
Autres productions	2H, 2D (p)	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Consommation de gaz fluorés	2E, 2F (p), 2G (p)	1,1	1,9	2,9	3,9	4,1	4,2	4,5	4,6	4,8	5,4	5,5	5,3	5,2	
Traitement des déchets		17,4	21,0	22,7	22,5	22,4	22,1	21,9	21,3	21,4	20,9	20,2	19,7	19,5	-11,9%
Mise en décharge	5A	12,7	15,9	17,8	17,8	17,6	17,4	17,1	16,5	16,5	16,0	15,3	14,8	14,3	
Incinération (5)	5C, 2D	2,3	2,3	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,6	1,6	1,8	
Eaux usées	5D	2,3	2,6	2,9	2,7	2,7	2,6	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6	2,6	2,6	
Autres	5B	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	
Total hors UTCATF (tous secteurs)		548,1	547,0	554,3	554,8	543,1	534,0	527,2	506,5	514,5	487,0	488,4	486,5	458,9	-16,3%
UTCATF	4	-30,6	-32,6	-32,8	-47,8	-51,9	-51,8	-50,8	-43,8	-38,8	-44,5	-52,5	-53,5	-50,6	65,6%
Total		517,5	514,4	521,6	507,0	491,2	482,2	476,3	462,7	475,8	442,5	435,8	432,9	408,3	-21,1%

(1) d'après CNUCC décembre 2015 (www.citepa.org)

(2) Métropole + Outre-mer faisant partie de l'UE

(3) trafic domestique uniquement

(p) partiel (catégorie CRF répartie entre plusieurs secteurs)

(4) y compris incinération des déchets avec récupération d'énergie

(5) hors incinération des déchets avec récupération d'énergie

UTCATF : Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêt

Source : CITEPA Inventaire CNUCC Décembre 2015

À cela s'ajoutent environ 13 % liés à l'utilisation de l'énergie dans l'industrie manufacturière⁵. et la construction hors traitement de déchets⁶. Ainsi, en incluant l'utilisation de l'énergie, en 2014, le «pouvoir de réchauffement global» (PRG)⁷ du secteur de l'industrie manufacturière représentait 18,5 % du PRG total de la France (y compris outre-mer) hors UTCF alors qu'en 1990, il en représentait 26,6 %.

Concernant la biomasse, les émissions sont comptabilisées hors total national. Entre 1990 et 2014, les émissions induites par la biomasse ont connu une forte augmentation (+ 72 %, soit +5,6 Mt CO₂ éq.) suite au recours accru au bois en tant que combustible.

1.3. Examen par branches émettrices : des progrès significatifs couplés à un effet sensible de la baisse de production industrielle

Un zoom sur les quatre branches précitées (chimie, minéraux non métalliques, métallurgie des métaux ferreux et agro-alimentaire) qui représentent les émissions les plus importantes de l'industrie manufacturière, aboutit à des situations contrastées :

- forte baisse des émissions de la chimie. Le tableau *supra* montre que ces diminutions sont essentiellement dues à des progrès spectaculaires sur les processus, la consommation énergétique variant assez peu ;

⁵ Source : Chiffres clés du climat France et monde, édition 2016, SOeS, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2369/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2016.html>

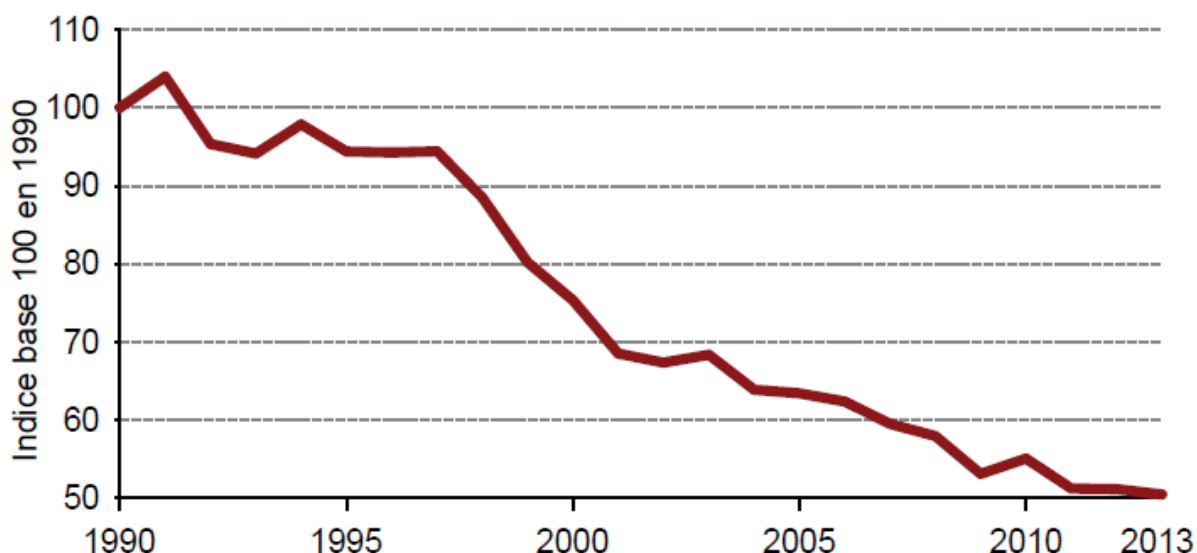
⁶ Les déchets représentent en 2014 des émissions de 19,5 MtCO₂éq en France et outre mer, émissions essentiellement dues à la mise en décharge. C'est plus de 4 % des émissions globales françaises hors UTCF.

⁷ LE PRG équivaut ici aux émissions de GES. En principe le potentiel de réchauffement global d'un gaz se mesure par rapport au CO₂. On a typiquement les valeurs suivantes, à respectivement 20 ans, 100 ans et 500 ans : méthane : 75, 25, 7,6 ; N₂O : 289, 298, 153 ; CF₄ : 5210, 7390, 11200 ; CHF₃ : 9400, 12400, 10000 ; SF₆ : 15100, 23500, 32400 Ces chiffres ne semblent pas tenir compte de la révision AR5 (méthane à 28 ou 34 selon les variantes par exemple)

- baisse continue des émissions des industries fabriquant des minéraux non métalliques, matériaux de construction. Les progrès ont été répartis de manière à peu près égale entre des progrès sur les processus et des progrès sur l'efficacité énergétique. Mais les diminutions d'émission sont en partie liées à des diminutions de production (par exemple la production de clinker est passée de 20,9 à 14,9 Mt entre 1990 et 2010). Les émissions spécifiques de CO₂ ont peu varié sur le clinker et ont diminué pour le verre (Cf courbe ci-dessous) ;
- il en va de même pour la production de métaux ferreux ;
- enfin, pour l'agro-alimentaire, les émissions diminuent légèrement, pour une production qui reste stable depuis 2010.

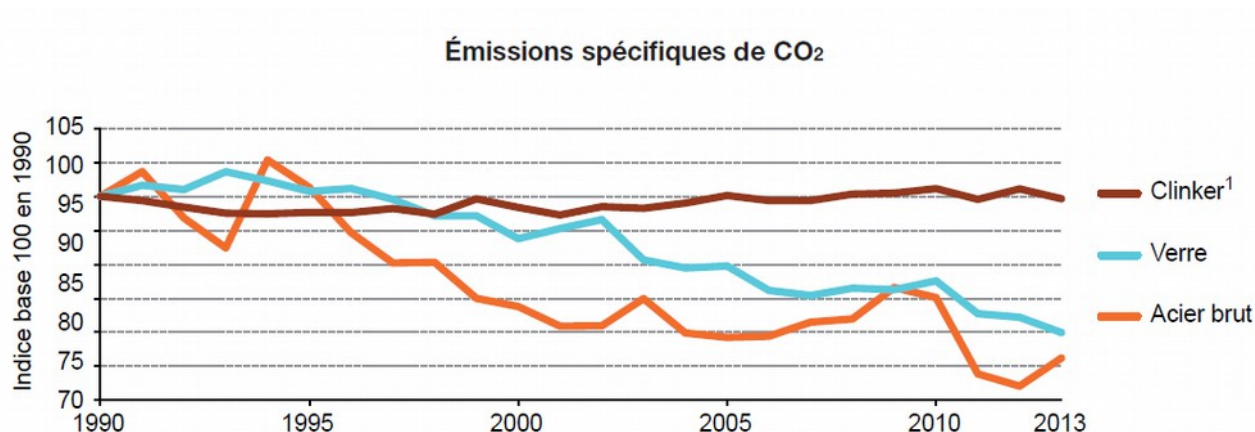
Globalement, cela montre l'importance de ramener les émissions des secteurs industriels à la production, pour bien mesurer ce qui est une amélioration effective. Le service de l'observation et des statistiques (SOeS) du ministère de l'environnement fournit quelques illustrations à ce sujet.

Émissions de GES par unité de valeur ajoutée



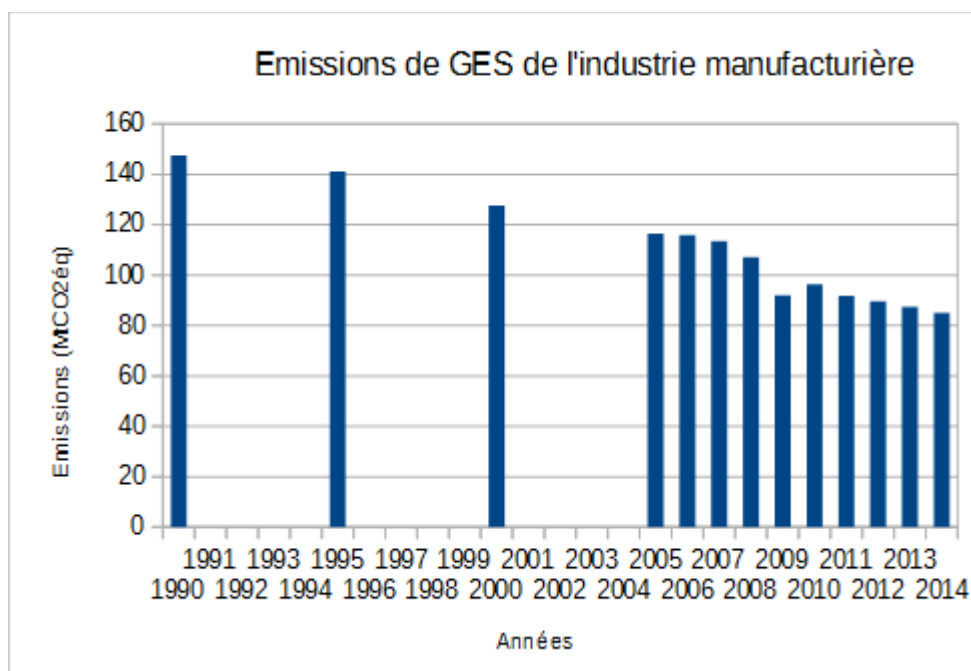
Source : SOES Chiffres clés du climat France et Monde édition 2016,

<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2369/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2016.html>



Source : SOES Chiffres clés du climat France et Monde édition 2016,
<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2369/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2016.html>

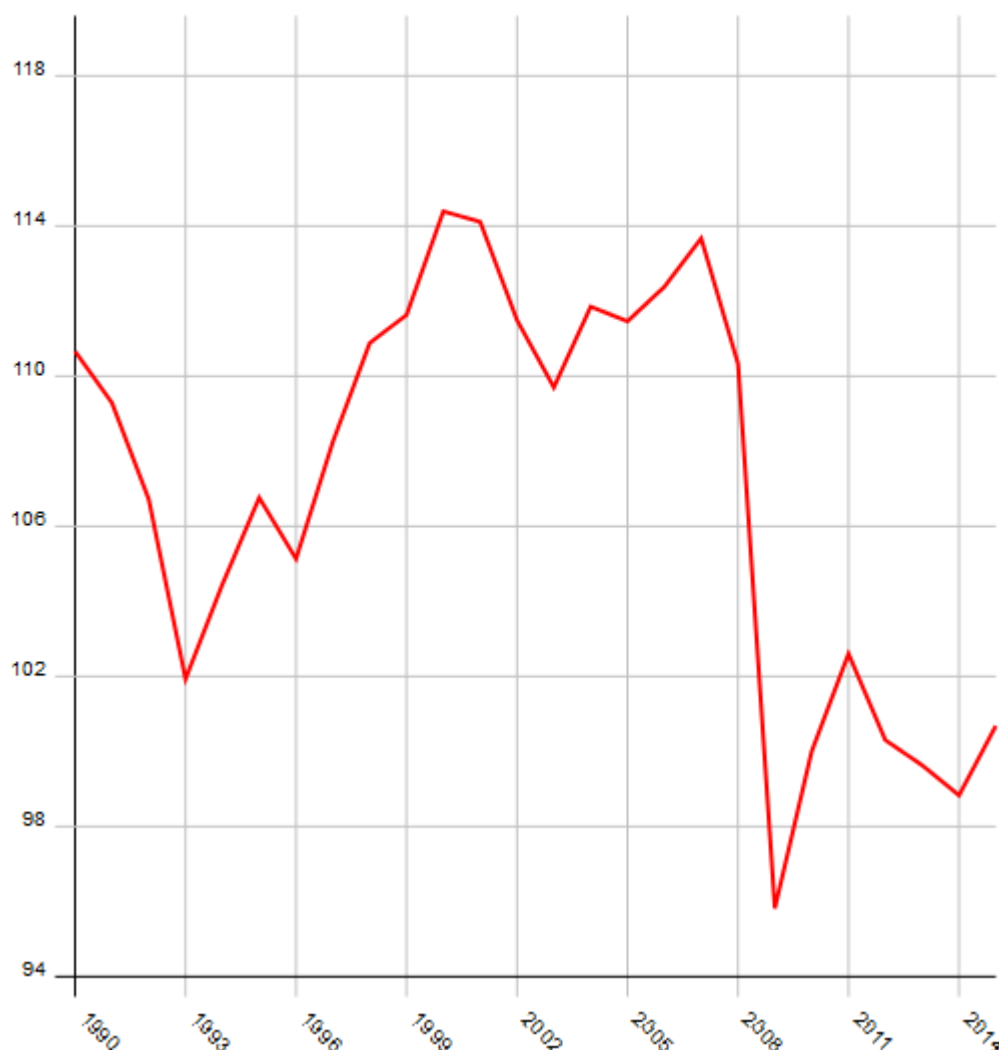
En conclusion, on observe une baisse régulière depuis 1990 des émissions de GES du secteur industriel, de 42,4 % depuis 1990.



Source : Chiffres CITEPA Inventaires CNUCC Décembre 2015,
<http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/ccnuc>

Cette évolution s'explique en partie par une baisse de la production industrielle en France, dont l'indice brut de la pollution industrielle de l'INSEE donne une idée. On peut considérer que 10 % de la diminution des émissions s'explique par une baisse d'activité.

Moyenne annuelle de la production industrielle (base 2010) - Industrie manufacturière, industries extractives et autres



Production industrielle des industries manufacturières et extractives - Source : Bases de données de l'INSEE⁸

1.4. Les émissions du secteur des déchets sont principalement dues à la mise en décharge

Les émissions liées à la mise en décharge, correspondant essentiellement à des émissions de méthane, représentent en 2014 environ $\frac{3}{4}$ des émissions du secteur déchets. Elles diminuent depuis 2000, corrélativement à la diminution de la mise en décharge des déchets⁹.

Celles liées à l'incinération progressent légèrement. Elles résultent d'une augmentation des tonnages incinérés, pour l'essentiel compensée par une meilleure valorisation de l'énergie produite¹⁰. Elles représentent un peu moins de 10 % des émissions déchets en 2014.

⁸ Voir <http://www.insee.fr/fr/bases-de-donnees/>

⁹ Le tonnage de déchets ménagers stockés est passé de 21,7 Mt en 2000 à 16,5 Mt en 2012. Voir chiffres clés ADEME <http://www.ademe.fr/dechets-chiffres-cles>

Enfin, les émissions liées aux eaux usées sont très stables. Elles représentent 13 % des émissions du secteur déchets.

1.5. Un rythme de réduction soutenu mais encore sans doute insuffisant

Ces réductions sont régulières et significatives, mais peut-être insuffisantes pour atteindre au rythme actuel le facteur 4 en 2050 : une réduction d'un tiers tous les 20 ans (rythme observé entre 1990 et 2010, pas forcément soutenable car plus on réduit plus les réductions ultérieures sont difficiles) aboutirait à un facteur 3,4 environ en 2050 ; une réduction d'un tiers tous les 25 ans (à production constante), ne le permet pas non plus, à plus forte raison, aboutissant à un facteur 2,25 entre l'année 2000 (année d'émissions très proches de celles de la référence 1990) et l'année 2050.

¹⁰ Les émissions de GES ne sont pas alors comptabilisées dans cette rubrique. Le tonnage de déchets incinérés est passé de 11,3 Mt en 2000 à 13,7 Mt en 2012. Le taux de valorisation est passé pendant la même période de 1700 à 2500 ktep. Voir chiffres clés ADEME <http://www.ademe.fr/dechets-chiffres-cles>

2. Quelques exercices de prospective antérieurs à 2013 pointent vers un potentiel de division significatif des émissions industrielles entre 1990 et 2050

Le secteur industriel a encore un potentiel important de réduction des émissions, évidemment très différent selon les branches. Divers exercices prospectifs récents de natures contrastées éclairent la problématique et sont présentés ci-après.

Ceux postérieurs à 2012 qui n'ont pas été pris en compte dans le rapport initial de 2012-2013 sur le facteur 4 sont présentés à la section suivante.

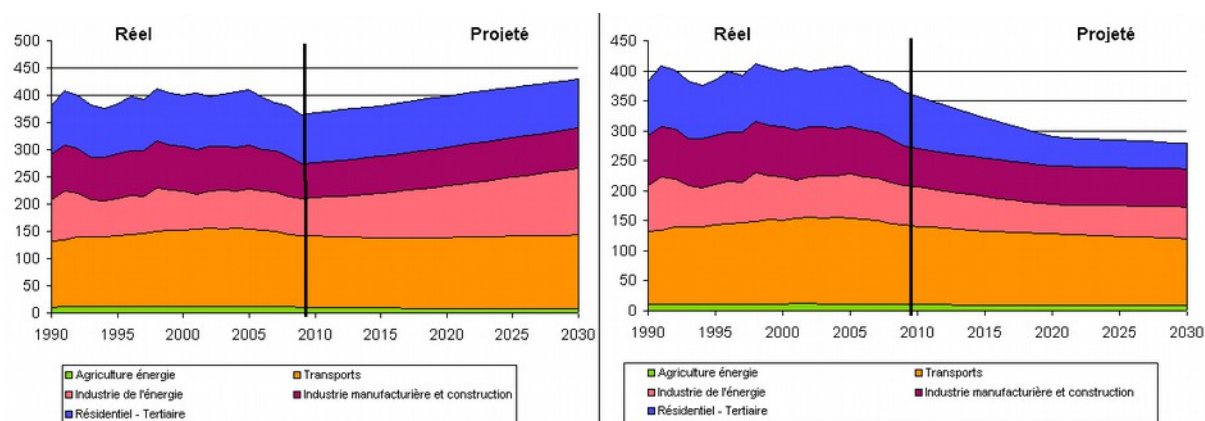
En substance, les réductions d'émissions de gaz à effet de serre passent par l'amélioration de l'efficacité énergétique des processus, la récupération, le recyclage, voire la réduction des besoins et productions.

2.1. Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030 – juillet 2011

La DGEC a produit des «**Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030**» (juillet 2011)¹¹ :

- un scénario tendanciel intégrant les effets escomptés des mesures effectivement prises en 2010 ;
- un second scénario prenant en compte l'atteinte des objectifs fixés à l'horizon 2020 et intégrant les mesures du «Grenelle».

La synthèse de ces travaux fournit une représentation graphique des évolutions des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie au regard des autres secteurs, dans le scénario Pré-Grenelle (à gauche) et dans le scénario Grenelle (à droite), en Mt CO₂ eq., qui laisse un champ important aux mesures encore à prendre pour améliorer la performance en 2030.



Évolution des émissions de GES en tendanciel et avec mesures post-grenelle – source, Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030, DGEC, 2011

¹¹ La synthèse de ces scénarios est téléchargeable http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/11-0362_5A_ET_note_synthese_sc_pros_v3.pdf.

Pour l'industrie (hors raffinage) les hypothèses de capacité d'amélioration en matière d'efficacité énergétique (et corollairement en émissions liées à l'utilisation de l'énergie) vont jusqu'à 25 % à l'horizon 2030 par rapport à 1990, concomitamment avec des productions d'évolutions variables (croissantes, décroissantes ou stables).

Tableau: Productions physiques des IGCE à l'horizon 2030 (Mt)

	1990	2005	2010	2020	2030
Acier brut	19	19.5	15.0	20.5	21.0
dont HF/02	13.6	12.2	9.6	13.0	13.0
dont elec	5.4	7.3	5.4	7.5	8.0
ethylene	2.3	2.9	2.9	2.9	2.9
chlore	1.3	1.5	1	1	1
ammoniac	1.6	1.2	1.2	1.2	1.2
clinker	20.9	17.3	14.6	14.8	16.5
papier	7.0	10.3	9	11	13.4
pâtes à papier	2.2	2.6	2.5	2.5	2.5
verre	4.9	5.5	4.5	6.0	6.4
aluminium	0.6	0.7	0.82	0.885	0.935
dont 1ère fusion			0.35	0.385	0.385
sucre	4.7	4.4	4.2	4.2	4.2

Hypothèses de production des industries grandes consommatrices d'énergie – source, Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030 » (juillet 2011)

Tableau : Consommation unitaire d'énergie (indice, base 1 = 1990)

	1990	2005	2010	2020	2030
Acier	1,00	0,86	0,98	0,92	0,87
Acier brut (proc. HF/O2)	1,00	0,92	0,97	0,87	0,79
Acier brut (proc. ele)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Ethylène	1,00	0,76	0,76	0,76	0,76
Chlore	1,00	0,97	0,96	0,90	0,85
Ammoniaque	1,00	0,80	0,77	0,75	0,75
Clinker	1,00	0,90	0,90	0,89	0,88
Papier-pâtes	1,00	1,00	0,75	0,75	0,75
Verre	1,00	0,90	0,83	0,86	0,86
Aluminium	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10
Sucre	1,00	0,95	0,95	0,95	0,95

Consommation unitaire d'énergie – source, Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air à horizon 2030 » (juillet 2011)

Un certain nombre des gains escomptés sont déjà acquis en 2010.

2.2. Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone – octobre 2011

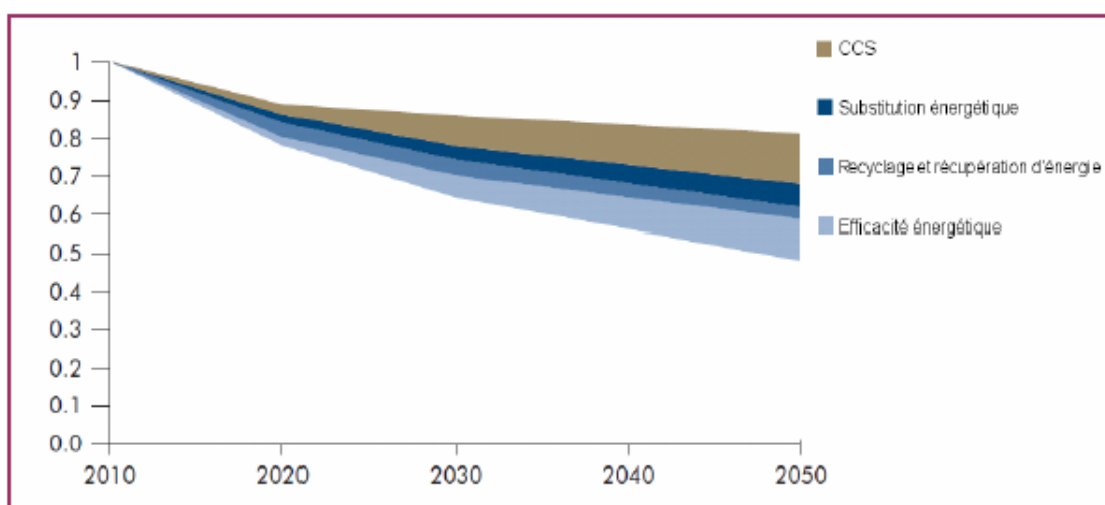
Le rapport « **Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone** »¹², encore dit « De Perthuis » ou « comité trajectoire », en date d'octobre 2011, a une toute autre approche, de rétro-prévision (« *backcasting* »), faisant de l'objectif son hypothèse.

Le rapport retient pour l'industrie une cible de réduction d'émissions de – 85 % entre 1990 et 2050 (cohérente avec la feuille de route européenne de 2011 qui cible une réduction comprise entre -80 % et -95 %), soit un effort supplémentaire de 50 % (environ 45 Mt CO₂ eq.), par rapport à un scénario tendanciel, pouvant être obtenu à hauteur de 30 % par la poursuite des gains d'efficacité énergétique, de 30 % par la récupération énergétique et le recyclage. Il reste alors encore 40 % à trouver dans la diffusion des techniques innovantes de type captage et stockage de CO₂. Beaucoup d'incertitudes pèsent cependant sur ces techniques, dont un grand nombre de démonstrateurs existent dans le monde, mais dont il est très difficile d'évaluer le potentiel et la faisabilité.

Pour les déchets, on ne trouve pas dans le rapport de trajectoire spécifique, le rapport soulignant les effets bénéfiques de la logique d'efficacité des ressources matières, de la prévention et du tri, de la rénovation pour prévenir les déchets des démolitions, de la valorisation énergétique des déchets dans l'industrie et l'agriculture. Dans le scénario de référence, les émissions de GES dues aux déchets diminuent de 28 % en 2020, 35 % en 2030, 42 % en 2040 et 75 % en 2050.

¹² <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/114000655/index.shtml>

Graphique 15 : Options pour réduire les émissions de CO₂ de l'industrie à horizon 2050 (indice 1 = émissions de CO₂ de l'industrie en 2010)



Source : travaux du Comité d'après AIE

Source: Rapport "Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone", p. 60, juillet 2011

Le rapport insiste sur la visibilité et la prévisibilité du signal prix du carbone (sous tendu par un souhait industriel de contrainte crédible en 2030), qui ne doit pas se développer au détriment de la compétitivité. Se pose dès lors la question de la valorisation du carbone importé (et exporté). Il convient en effet que les réductions d'émission ne provoquent pas de désindustrialisation pour cause de handicap de compétitivité.

2.3. Négawatt – septembre 2011 actualisé juillet 2013

L'association Négawatt a produit en septembre 2011 un scénario dit **négaWatt 2011** (mis à jour en juillet 2013) conçu pour la France métropolitaine¹³ basé une démarche d'abord de sobriété (division par 2 ou 3 des besoins en énergie finale ou primaire entre 2010 et 2050 par exemple), puis d'efficacité (ce qui exclut le recours à des énergies de stock et donc le recours au nucléaire-abandonné en 2033-, le stockage du carbone ou l'exploitation de gisements nouveaux), et enfin d'usage des renouvelables (90% de la ressource énergétique en 2050). Les émissions de GES globales sont divisées par 2 en 2030 et par un facteur élevé de 15 en 2050.

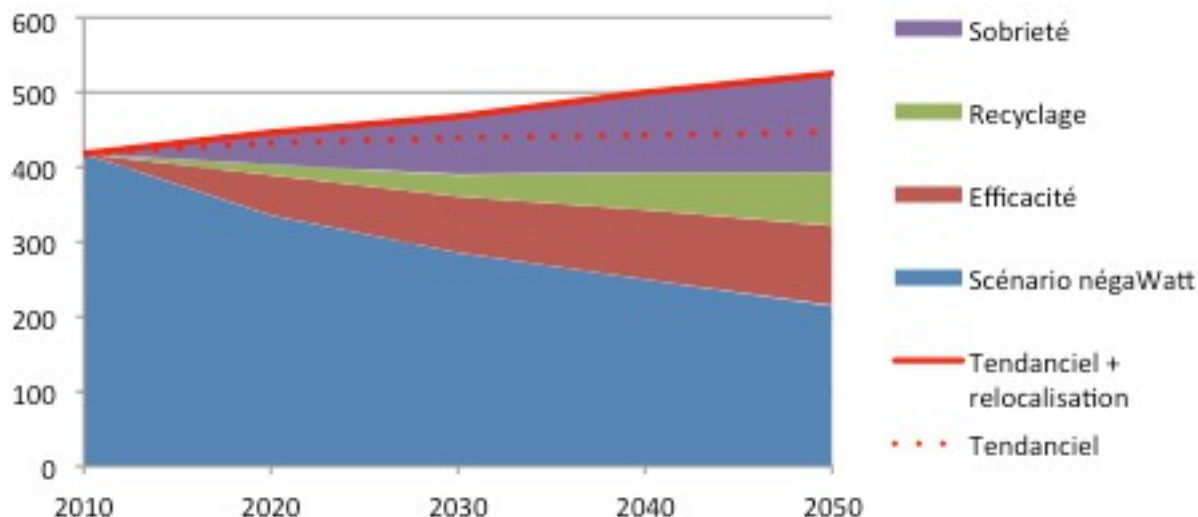
Pour l'industrie, le scénario négaWatt, constatant les fortes réductions observées entre 1990 et 2011 (facteur 1,7)¹⁴ considère qu'une très forte décarbonisation supplémentaire du secteur industriel est difficile, avec à l'arrivée un potentiel global de réduction de 3,5 entre 1990 et 2050.

Pour ce faire, le scénario suppose une mutation de l'industrie avec une baisse de besoins en matériaux, une amélioration de l'efficacité et un recyclage accru: la décarbonisation de la fabrication de chaux et de ciment et l'élimination des gaz fluorés constituent les gisements principalement envisagés. Plus précisément, le scénario repose sur une production sobre (efficacité, recyclage...), de la relocalisation

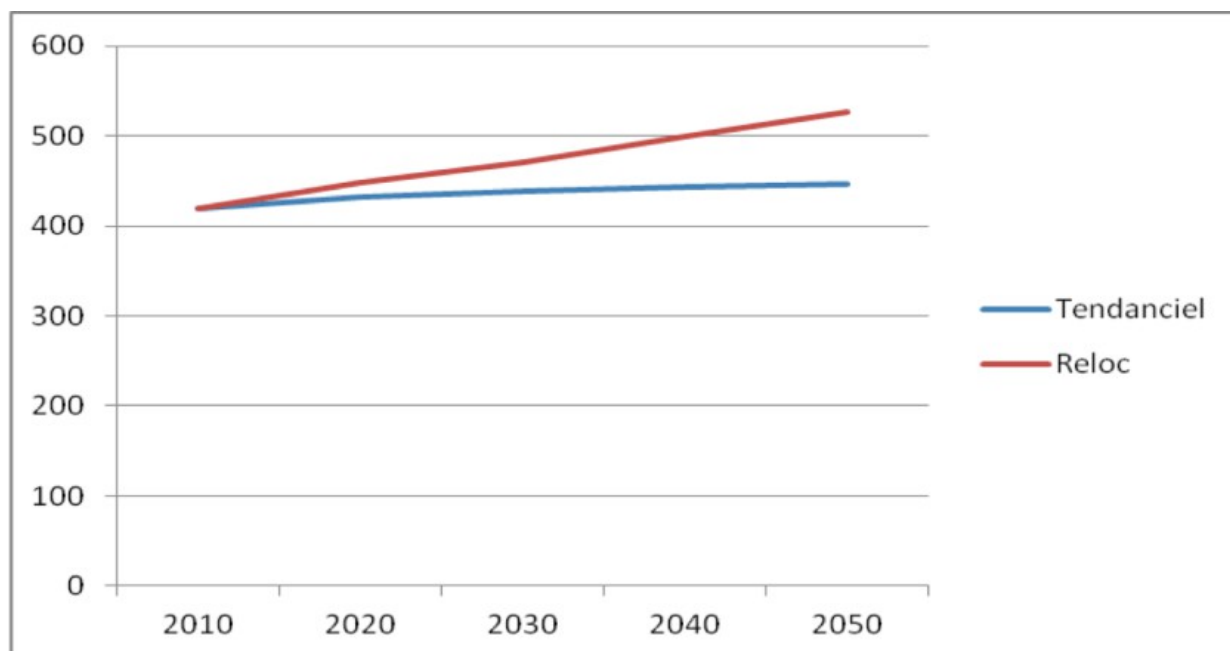
¹³ http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

¹⁴ Rapport technique, http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Rapport_technique//150505_Partie4_Resultats_scenario-negaWatt.pdf, p. 151

progressive, une consommation elle-même plus sobre, de forts gains en efficacité (moteurs électriques +35 %, sidérurgie +32 %, cimenteries +50%) et en recyclage (30 % des plastiques issus du recyclage contre 4,5 % aujourd'hui, 90 % des aciers issus du recyclage contre 52 % aujourd'hui), une cogénération portée à 50 % en 2050 contre 2 % aujourd'hui (13 TWh économisés), de la récupération par réseau de chaleur portée à 10 TWh, etc. À l'arrivée, sobriété, efficacité et recyclage contribuent comme suit à la baisse de consommation (en TWh sur le graphique) :

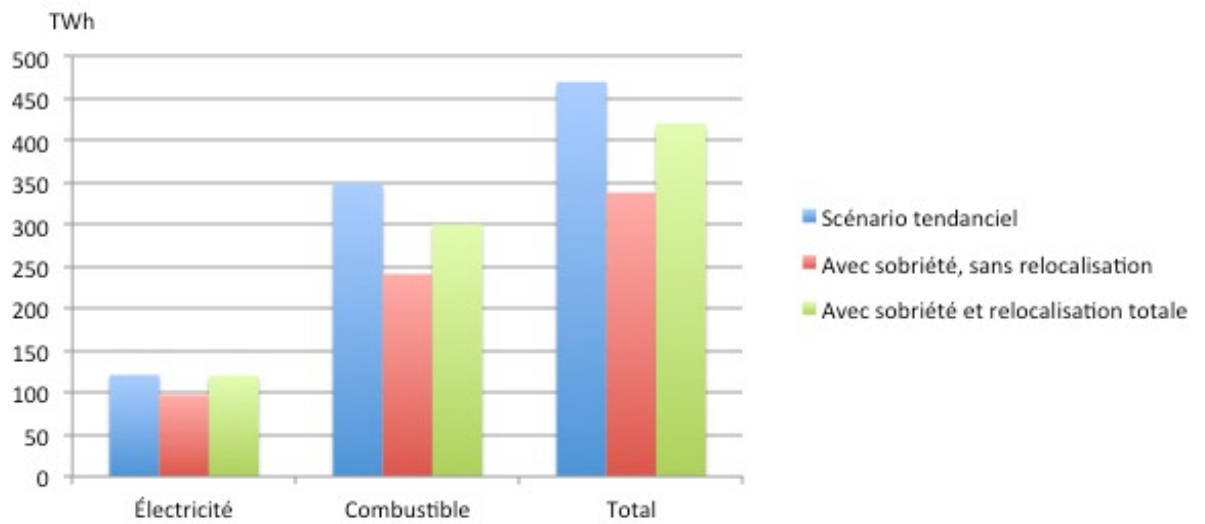


Impact de la sobriété, du recyclage et de l'efficacité par rapport à une consommation d'énergie tendancielle de l'industrie majorée de la relocalisation
– Source, négaWatt



Impact de la relocalisation sur la consommation d'énergie de l'industrie par rapport à un scénario tendanciel – Source, négaWatt

Par utilisation d'énergies cela donne :



Bilan en 2050 de la sobriété et de la relocalisation sur la consommation énergétique de l'industrie – Source, négaWatt

3. Évolutions récentes : nouveaux scénarios et nouvelles politiques

Depuis le rapport de 2013, les circonstances ont notablement évolué. Les prix du pétrole se sont effondrés en 2014. Les scénarios ont été consolidés et ont alimenté l'élaboration de politiques et stratégies nouvelles, elles-mêmes cohérentes avec les orientations européennes et internationales. Ces évolutions récentes sont exposées chronologiquement *infra*.

3.1. Vision 2030-2050 de l'ADEME – juin 2013

L'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 »¹⁵, mené par l'ADEME en 2012 et publié en juin 2013, se décompose en : un scénario « ambitieux et réaliste d'évolution de la consommation énergétique et de la production d'énergies renouvelables » pour 2030 avec comme indicateurs principaux la consommation énergétique et les émissions de CO2 (avec -40 % en 2030 par rapport à 1990) ; et un exercice normatif de vision pour 2050 compatible avec le Facteur 4. Il cumule donc une perspective tendancielle volontariste pour 2030, et un exercice de « rétrodiction » (« backcasting ») pour 2050.

Pour l'industrie, l'étude met en exergue à l'horizon 2030 « des potentiels d'augmentation du recyclage (qui atteint 60% à 100% selon les sous-secteurs) et d'efficacité énergétique de 19,6% en moyenne ».

Taux de réincorporation	2010	2030	Commentaire
Aluminium	78,3%	90,0%	Limitation des exportations
Zinc	44,5%	60,0%	
Acier, dont filière oxygène	114 kg/ tonne de fonte	~150 kg/ tonne de fonte	Seuil maximum : 160 kg/tonne de fonte
Acier, dont filière électrique	100%	100%	Uniquement constituée de ferraille
Verre creux	63,1%	70%	Limitation par le taux de collecte
TAUX DE REINCORPORATION ET RECYCLAGE			

Potentiel d'augmentation du recyclage industriel - Source: Vision 2030-2050 de l'ADEME, synthèse, p. 13, juin 2013

¹⁵ <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050> ; Synthèse http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/85536_scenarios_2030_2050_synthese_0613.pdf, document technique http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/85536_vision_2030-2050_document_technique.pdf

Industrie	Gains	Répartition par type de gains (non sommables)	● Organisationnel ● Innovation ● Eprouvée
Sidérurgie	-7,5 %	● 0,7 % ● 3,2 % ● 3,7 %	
Métaux primaires	-12,7 %	● 1,8 % ● 0 % ● 11,5 %	
Chimie	-18,0 %	● 2,6 % ● 6,5 % ● 11,2 %	
Minéraux non métalliques	-14,3 %	● 2,9 % ● 3,0 % ● 10 %	
Industrie agro-alimentaire	-29,4 %	● 5,5 % ● 5,8 % ● 20,8 %	
Equipement	-27,7 %	● 6,9 % ● 4,0 % ● 20,1 %	
Autres	-25,2 %	● 4,5 % ● 5,5 % ● 17,3 %	
Total	-19,6 %	Gain par unité produite	

Potentiel d'augmentation de l'efficacité énergétique industrielle - Source: Vision 2030-2050 de l'ADEME, synthèse, p. 13, juin 2013

Les émissions de GES dues aux déchets ne diminuent en revanche pas à l'horizon 2030, les émissions de méthane dues aux décharges augmentant légèrement entre 190 et 2030. Le rapport souligne néanmoins le potentiel offert par le compostage puisque 13,5 % des déchets présents dans les ordures ménagères sont compostés alors que 50 % pourraient l'être. Une meilleure valorisation énergétique (hypothèse de 1,4 Mtep en 2030 en énergie primaire) et une augmentation du recyclage sont d'autres pistes de diminution des émissions.

Les émissions de GES à l'horizon 2030, tous secteurs, sont ainsi les suivantes :

Bilan des émissions de gaz à effet de serre en Mt C02 eq

	1990				2030			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES
Industrie								
Combustion	79,9			79,9	49,8			49,8
Process	25,2		23,6	48,8	21,2		2,6	23,8
Résidentiel principal								
Combustion	67,2			67,2	20,8			20,8
Autres		4,3	0,9	5,2		5,5	1,0	6,5
Tertiaire								
Combustion	28,7			28,7	9,0			9,0
Autres				0,0				0,0
Transports								
Combustion	113,3			113,3	96,8			96,8
Autres				0,0			1,0	1,0
Agriculture								
Combustion	8,7			8,7	5,5			5,5
Autres		51,6	36,6	88,2		33,8	30,3	64,1
Production d'énergie	62,1	6,8		68,8	19,4	0,1181	0,5254	20,0
Déchets	1,7	11,3	1,4	14,4	1,4	12,5	1,2	15,2
Solvants	1,8			1,8	1,0			1,0
Total	388,7	73,9	62,6	525	225,0	51,9	36,7	313 (-40%)

ÉVOLUTION DES GAZ À EFFET DE SERRE (GES) 1990-2030

Source : Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions 2030-2050

Pour 2050, l'approche retenue par la vision de l'ADEME en matière industrielle « a été de poursuivre les évolutions de structure prises à 2030 et de reprendre les mêmes gains d'efficacité entre 2030 et 2050 qu'entre 2010 et 2030 ». En pratique cela permet une réduction de plus du quart de la consommation d'énergie (passage de 36,5 Mtep en 2010 à 33,2 Mtep en 2030 et 26,7 Mtep en 2050) malgré une croissance d'activité.

Les émissions de GES en 2050 sont les suivantes :

Bilan des émissions de gaz à effet de serre en Mt CO₂ eq

	1990				2050			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES
Industrie								
Combustion	79,9			79,9	35,5			35,5
Process	25,2		23,6	48,8	17,1		1,8	18,8
Résidentiel principal								
Combustion	67,2			67,2	4,8			4,8
Autres		4,3	0,9	5,2		0,1	0,0	0,1
Tertiaire								
Combustion	28,7			28,7	1,3			1,3
Autres				0,0				0,0
Transports								
Combustion	113,3			113,3	8,5			8,5
Autres				0,0			0,0	0,0
Agriculture								
Combustion	8,7			8,7	3,9			3,9
Autres		51,6	36,6	88,2		22,0	24,9	46,9
Production d'énergie	62,1	6,8		68,8	3,1	0,0		3,1
Déchets	1,7	11,3	1,4	14,4	0,7	6,3	0,6	7,6
Solvants	1,8			1,8	10,5			0,5
Total	388,7	73,9	62,6	525	75,4	28,4	27,3	131 (-75%)

ÉVOLUTION DES GAZ À EFFET DE SERRE (GES) 1990-2050

Source : Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions 2030-2050

Ainsi, dans la vision ADEME, les émissions de GES de l'industrie liées à la combustion passent de 79,9 Mt CO₂ eq en 1990 à 49,8 Mt en 2030 et 35,5 Mt en 2050 ; celles liées aux processus passent de 48,8 Mt en 1990 à 23,8 Mt en 2030 et à 18,8 Mt en 2050. Au total, les émissions de GES industrielles passent donc de 128,7 Mt CO₂ eq en 1990 à 73,6 Mt CO₂ eq en 2030 puis 54,5 Mt CO₂ eq en 2050 soit une réduction de 58 %.

Bien que normatif et ambitieux, le scénario reste, pour le secteur industriel, en retrait des 75 % requis pour le facteur 4.

3.2. Les trajectoires énergétiques du DNTE – juillet 2013

Le **débat national sur la transition énergétique** (DNTE) a émis en juillet 2013 quatre trajectoires récapitulant divers scénarios¹⁶ : la trajectoire DEC incarnant le scénario Négatep normatif facteur 4 sur les émissions de CO₂ liées au secteur de l'énergie, la trajectoire DIV incarnant le scénario ANCRE DIV normatif visant le facteur 4 en 2050 et 50 % de nucléaire en 2025, la trajectoire EFF incarnant le scénario ADEME avec pour 2030 une vision volontariste de maîtrise de la consommation et de développement des renouvelables et une approche normative pour 2050, et enfin la trajectoire SOB incarnant le scénario négaWatt normatif facteur 4 de sortie du nucléaire et des fossiles

¹⁶ http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

avec des étapes décennales construites en fonction des potentiels de sobriété, d'efficacité énergétique et de développement des renouvelables.

Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, p. 8, juillet 2014

Les trajectoires sont normatives et visent l'attente du facteur 4 en 2050. Elles diffèrent entre autres par leur consommation énergétique à l'horizon 2050 (DEC et DIV ont une consommation énergétique élevée, EFF et SOB une consommation presque inférieure de moitié). Les émissions de GES correspondantes (liées aux consommations énergétiques) visent toutes le facteur 4 en 2050 ou plus, DIV et DEC s'en rapprochant de justesse, EFF et surtout SOB le dépassant.

Pour le secteur industrie, les mesures proposées portent sur l'efficacité énergétique des processus et aussi des autres usages, l'évolution des processus, et le recyclage des matériaux.

Trajectoire	Principales mesures quantifiées	Stratégie
DEC	<ul style="list-style-type: none">• Amélioration de l'efficacité énergétique de 25 % d'ici 2050• Energies renouvelables chaleur 1,4 → 4 Mtep en 2050	<ul style="list-style-type: none">• Augmentation de 0,8% / an de l'activité industrielle, accroissement des quantités produites• Electrification des procédés

DIV	<ul style="list-style-type: none"> • L'amélioration potentielle de l'efficacité énergétique est de 10 à 40 % selon les secteurs • Consommations énergétiques stables, pour une production industrielle sensiblement accrue. • Baisse de consommation des IGCE (Industries Grandes Consommatrices d'Energie), légère hausse pour les autres industries (AI) (l'efficacité énergétique compense la hausse d'activité) 	<ul style="list-style-type: none"> • Les IGCE (Industries Grandes Consommatrices d'Energie) se maintiennent ou décroissent (lien notamment avec les nouveaux matériaux dans le bâtiment); les autres industries sont en croissance • Bascules énergétiques des combustibles fossiles vers vecteurs énergétiques renouvelables • L'amélioration potentielle de l'efficacité énergétique est de 10 à 40 % selon les secteurs • L'amélioration est plus rapide pour les IGCE qui ont un intérêt économique immédiat
EFF	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité énergétique de 19,6% en moyenne sur 2010 – 2030 ; idem sur 2030 – 2050 • Augmentation du recyclage (qui atteint 60% à 100% selon les sous-secteurs) • Réduction de plus d'un quart de la consommation d'énergie malgré une croissance de l'activité 	<p>Pour 2050, l'approche retenue a été de poursuivre les évolutions de structure prises à 2030 et de reprendre les mêmes gains d'efficacité entre 2030 et 2050 qu'entre 2010 et 2030. Ceci permet une réduction de plus d'un quart de la consommation d'énergie malgré une croissance de l'activité (maintien de sa part dans le PIB et stabilisation des productions physiques au niveau de celles atteintes dans le scénario 2030).</p>
SOB	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité énergétique sur les opérations transverses (30% des consommations, 80% de l'électricité) : -43% • Efficacité énergétique spécifique par secteur qui va de -20% à -60% • En 2050, la consommation énergétique de l'industrie peut être réduite de moitié sans pénaliser l'activité économique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Revitalisation de l'industrie et création d'emplois • Relocalisation des activités • Adaptation de la production à la consommation • Sobriété sur les usages • Exploitation de la collecte au lieu de l'exporter • Augmentation des taux de recyclage (pouvant atteindre 80-90% pour l'acier, l'aluminium, le verre, le papier, etc.) • Efficacité énergétique sur les opérations transversales, sur les process spécifiques) • Switch combustible → électricité

Source: Mesures de la transition énergétique pour l'industrie, Étude des quatre trajectoires du DNTE, MEDDE, pp. 60-61, février 2014,
http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

Les consommations d'énergie du secteur industriel sont notablement assez différentes d'un scénario à l'autre.

2010		2050	Mix énergétique final du secteur industrie en 2050					
Mtep	Trajectoire	Mtep	Electricité	Gaz de réseau	Réseau de chaleur	Pétrole	Charbon	ENR directes et déchets
36,6	DEC	37	50%	25%	1%	3%	13%	9%
	DIV	35	33%	14%	12%	7%	3%	32%
	EFF	27	28%	22%	1%	21%	15%	13%
	SOB	21	41%	23%	6%	2%	5%	22%

* hors calories eau, air et sol des pompes à chaleur. La prise en compte de ces calories modifie la répartition en pourcentage de la demande d'énergie finale par vecteur, en augmentant la part des énergies renouvelables directes et en diminuant la part des autres vecteurs. Le développement des pompes à chaleur dans le secteur industrie est faible dans les 4 trajectoires.

Source: Mesures de la transition énergétique pour l'industrie, Étude des quatre trajectoires du DNTE, MEDDE, p. 62, février 2014, http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

Les réductions de consommation d'énergie en 2050 par rapport à 2010 varient entre zéro et 40 % environ. Les émissions liées aux consommations d'énergie sont réduites d'autant.

3.3. Le projet DPPP – septembre 2015

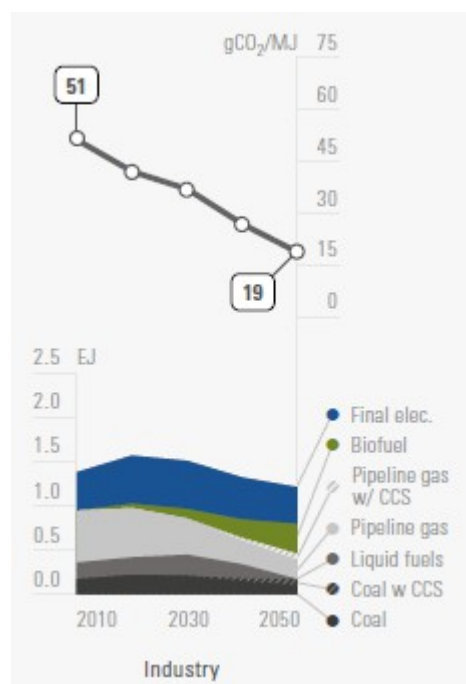
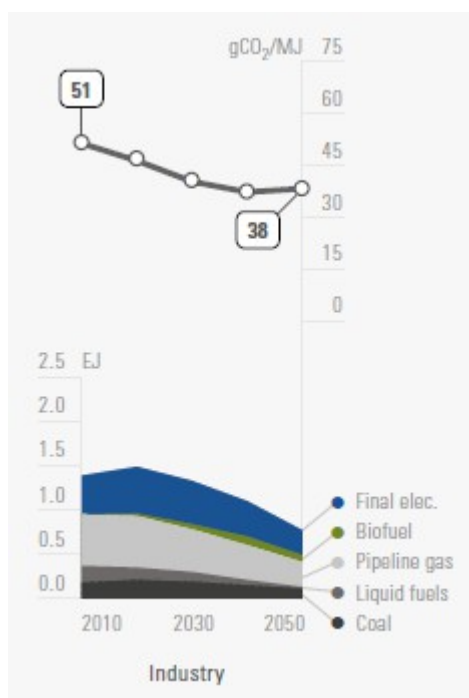
Dans le sillage des travaux du DNTE, les travaux du **DDPP** (deep decarbonization pathway project)¹⁷ s'attachent à quantifier les effets temporels de mesures diverses dans les scénarios d'émissions. Le travail est fait à l'échelle mondiale, mais propose sur la base des scénarios précités du DNTE une déclinaison pour la France¹⁸. Incidemment est fait le constat d'une certaine similitude entre les orientations de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte en date du 7 août 2015 (LTECV) et le scénario de type EFF¹⁹, en raison de l'objectif de division par deux de la demande énergétique finale en 2050 par rapport à 2012 (LTECV) ou 2010 (trajectoire EFF). Cet objectif est ambitieux, et en cas d'échec sur ce point d'autres trajectoires doivent être considérées avec une moindre réduction de la consommation énergétique mais une plus grande part d'énergie décarbonée. Les travaux du DDPP étudient notamment la possibilité de réorienter la stratégie vers la trajectoire DIV (-20 % de réduction de demande énergétique en 2050 par rapport à 2010, 50 % d'électricité nucléaire après 2025, 40 % de renouvelables dans le mix électrique en 2050), qui elle-même repose notamment sur une nouvelle génération de centrales nucléaires. La conclusion est que la trajectoire EFF reste la plus robuste.

La trajectoire énergétique et d'intensité carbone pour l'industrie est, dans les scénarios d'efficacité et de diversité :

¹⁷ <http://deepdecarbonization.org/countries/#france>

¹⁸ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

¹⁹ « La trajectoire EFF, inspirée des scénarios ADEME, GRDF, ANCRE Sob et Encilowcarb renforcé, prévoit une baisse de la demande énergétique importante et une diversification du mix énergétique. A horizon 2030, la trajectoire EFF vise à tirer, de manière ambitieuse mais réaliste, le potentiel maximum des économies d'énergie et des énergies renouvelables. », selon le document « Étude des 4 trajectoires du DNTE », http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

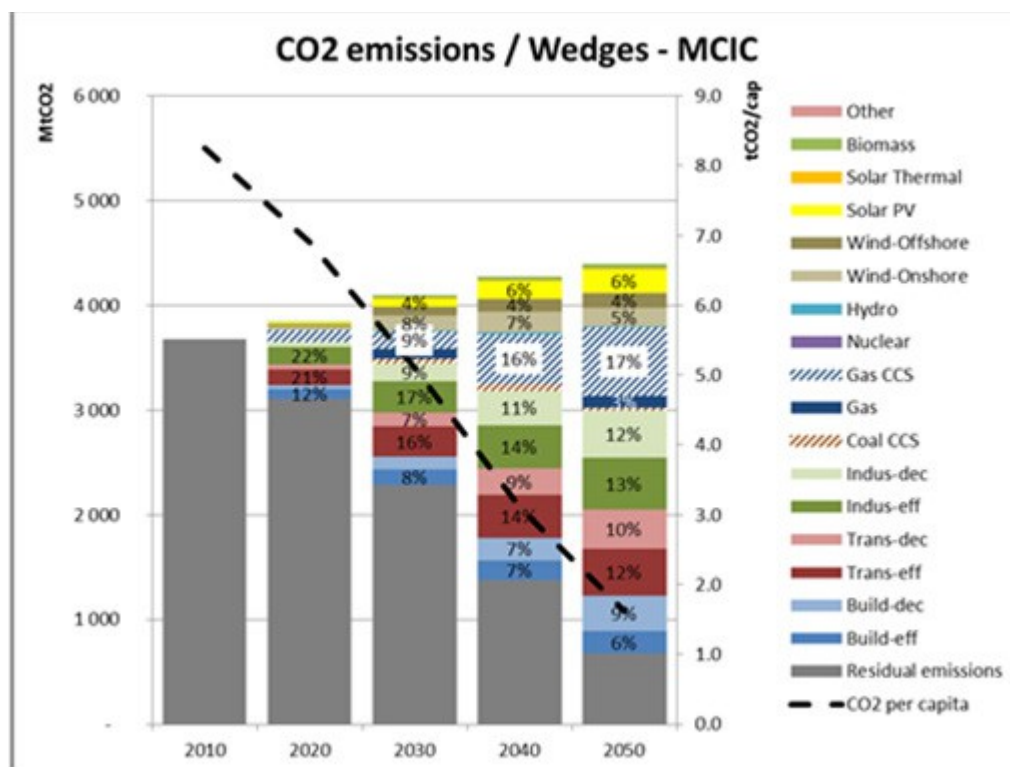


Intensité carbone industrielle dans le scénario efficacité et dans le scénario diversité - Source : DPPP, 2015

3.4. Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, rapport 2013 – janvier 2014 et le rapport ANCRE sur les « decarbonization wedges » - novembre 2015

Pour mémoire, les **scénarios de l'ANCRE** (alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie)²⁰ recourent à l'approche des « coins de décarbonation » (**decarbonization wedges**) qui permettent de quantifier et visualiser graphiquement l'impact de mesures au fil du temps, à partir d'une situation initiale. L'étude est faite au niveau mondial. Par exemple pour un pays industrialisé mais moyennement carboné comme la France, l'on a des graphiques comme suit, présentant l'effet, au fil du temps, de différentes mesures (promotion des énergies renouvelables, efficacité, décarbonation...) dans différents secteurs (industrie, transports, bâtiment):

²⁰ http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.asp?private_resource=984&fn=Doc+complet+ANCRE+version+finale+15+Janv_0.pdf



Source : Decarbonization wedges report, novembre 2015, p. 13

Le rapport le plus récent date de novembre 2015²¹ et a été préparé à temps pour la COP21. L'approche se base sur les scénarios du DDPP.

Ces scénarios sont indicatifs, non spécifiques à la France.

3.5. La SNBC – novembre 2015

La **stratégie nationale bas carbone (SNBC)**²², présentée fin 2015, est élaborée en cohérence avec les objectifs de la LTECV (loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte) propose un chemin sur la base de budgets carbone sectoriels à ne pas dépasser sur trois périodes successives de cinq ans.

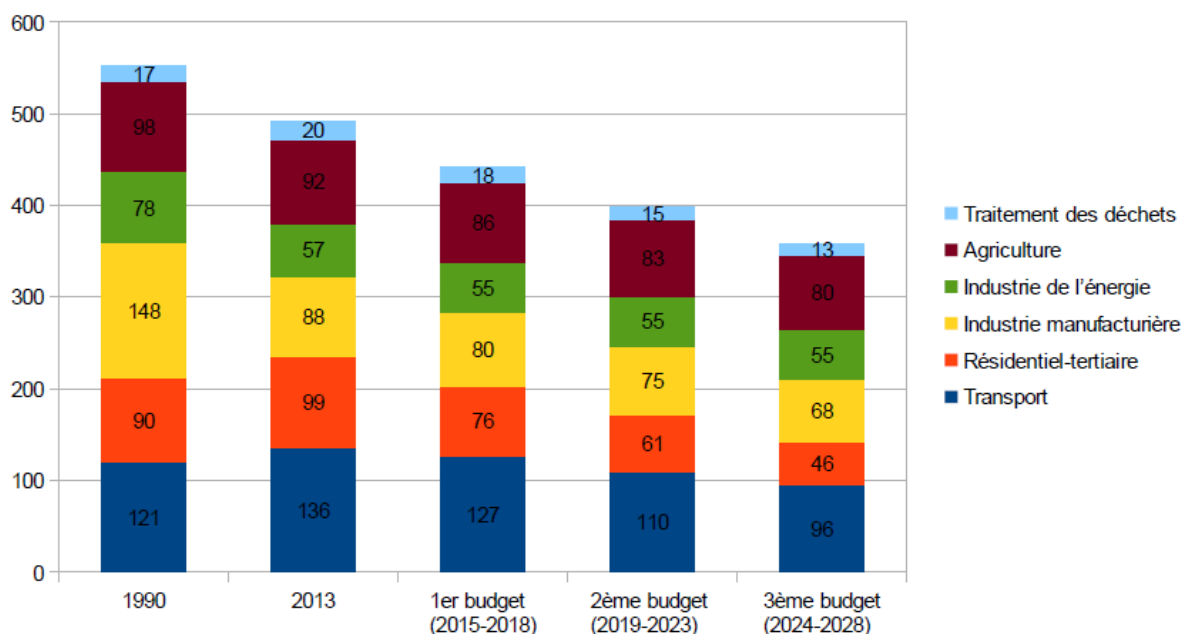
L'essentiel de l'effort relatif envisagé porte sur le résidentiel-tertiaire, puis sur le traitement des déchets puis les transports. L'industrie manufacturière (qui de fait a baissé ses émissions de 40,5 % entre 1990 et 2013) vise une réduction de 9,1 % de la moyenne annuelle de la première période 2015-2018 par rapport à 2013, puis 6,3 % de la moyenne annuelle de la seconde période 2019-2023 par rapport à la précédente, puis 9,3 % de la troisième période par rapport à la seconde.

²¹ http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

²² <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

et

Répartition sectorielle indicative



Source : SNBC, novembre 2015

Les recommandations sectorielles en faveur du traitement des déchets portent sur la prévention des déchets, l'augmentation des taux de recyclage, la valorisation énergétique, la réduction des émissions de méthane des décharges et stations d'épuration, enfin la valorisation énergétique systématique des déchets incinérés. Ainsi, par exemple, le méthane des décharges doit être capté à 70 % en 2030 (38 % en 2010) pour être valorisé sous forme de biogaz (taux de 80 % visé en 2030 contre 59 % en 2010) ou à défaut torché. Ces orientations sont cohérentes avec le plan déchet qui vise une diminution de 2,5 MtCO₂eq en 2025.

Les recommandations sectorielles de la SNBC en faveur d'une « Industrie bas-carbone » sont « par ordre de priorité décroissante ou chronologique : l'efficacité énergétique pour maîtriser la demande en énergie et en matière par produit ; le recyclage, la réutilisation et la récupération d'énergie pour diminuer la consommation d'énergie et de matière; la substitution énergétique afin de diminuer la part des énergies fortement émettrices dans la consommation industrielle et dans les matériaux; le développement et le déploiement de la capture et du stockage du carbone (CSC) à long terme, afin de réduire l'intensité en GES des énergies et des procédés. »

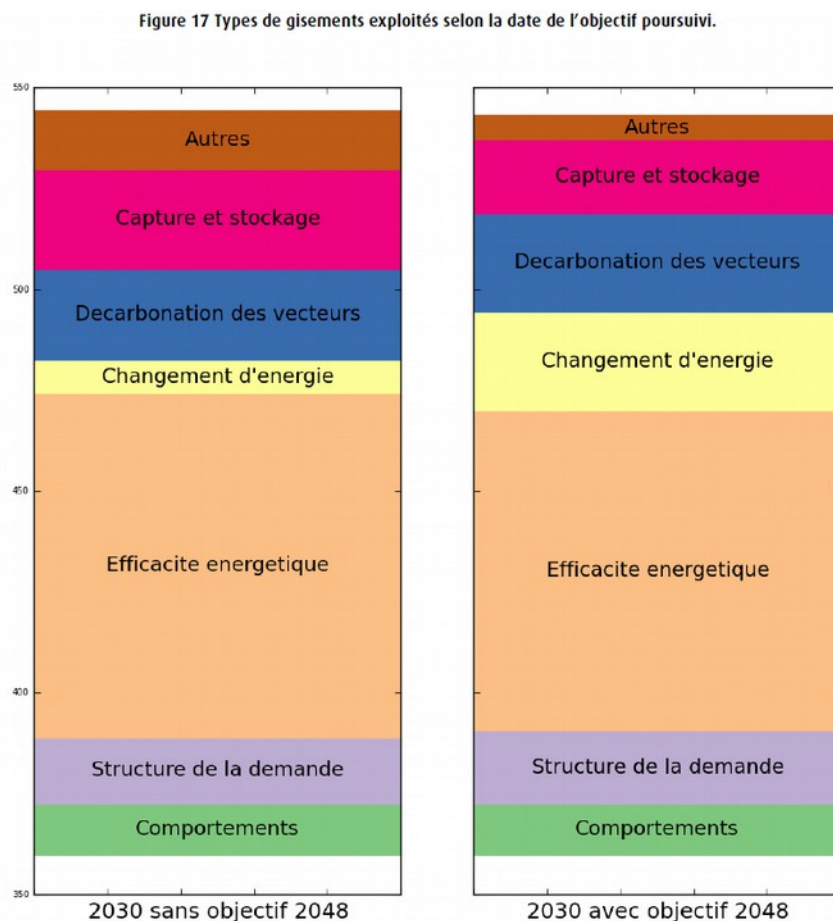
Les conditions de succès sont le développement et le déploiement de la capture et du stockage du carbone (CSC), l'exploitation du gisement technico-économique industriel d'économies d'énergies, sous-exploité car non prioritaire, la mise en place d'un signal prix carbone visible et prévisible sans impact sur la compétitivité.

En matière d'efficacité, « Le scénario de référence suppose des gains d'efficacité énergétique en 2030 par rapport à 2010 par tonne produite de 20 % pour le secteur de l'industrie. Les potentiels de gains par filière sont de l'ordre de -8 % pour la sidérurgie; -13 % pour métaux primaires; -18 % pour chimie; -19 % pour minéraux non métalliques; -29 % pour IAA²³; -28 % pour équipement; -25 % pour autres. Ces gains

²³ Industrie agroalimentaire

ont été estimés sur la base des données de potentiels de gisements de l'ADEME et du CEREN. ». L'intensité en GES des énergies utilisées s'obtient par substitution (gaz, biomasse, déchets...), récupération et valorisation (10 TWh en 2030), utilisation de la CSC (- 85 % dans l'industrie chimique en 2050). L'intensité en GES des produits s'obtient par recyclage (acier et papier 90 %, verre 85 %, acier aluminium 80%), etc.

Selon une note du CGDD « Trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », la répartition de l'importance des gisements pour la SNBC est comme suit :



Comparer les efforts sectoriels obtenus dans le scénario agrégé avec les efforts définis par la SNBC

Source: « Trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », CGEDD, 2016

Cette sortie graphique permet de visualiser les impacts de différentes mesures à moyen terme, à l'horizon de la 3^e période de la SNBC. L'efficacité énergétique joue le rôle principal, suivi de la décarbonation des vecteurs, de la capture et du stockage du CO₂, de la structure de la demande. Le changement d'énergie prend de l'importance si un objectif à long terme est intégré. Les comportements ont une influence perceptible mais relativement peu importante dans cette simulation.

Ainsi, à l'horizon 2028 (proche de 2030) les émissions industrielles sont réduites, dans la SNBC, de 23 % en 15 ans par rapport aux émissions de 2013 et de 54 % en 38 ans par rapport aux émissions de 1990. Un effort de -45 % en 22 ans, plus intense, serait ensuite requis pour atteindre, au sein du secteur industriel, le facteur 4 en 2050. De fait, l'effort implicitement requis par la SNBC est encore plus important puisque selon la SNBC « Le comité trajectoire (2012) a estimé que l'atteinte du facteur 4 à l'horizon

2050 par rapport à 1990 tous secteurs confondus supposait une réduction de 85 % des émissions directes du secteur de l'industrie » et que les réductions visées dans la SNBC sont cohérentes avec cette trajectoire de réduction, qui elle vise un facteur 6,6 très ambitieux.

3.6. Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 – septembre 2015

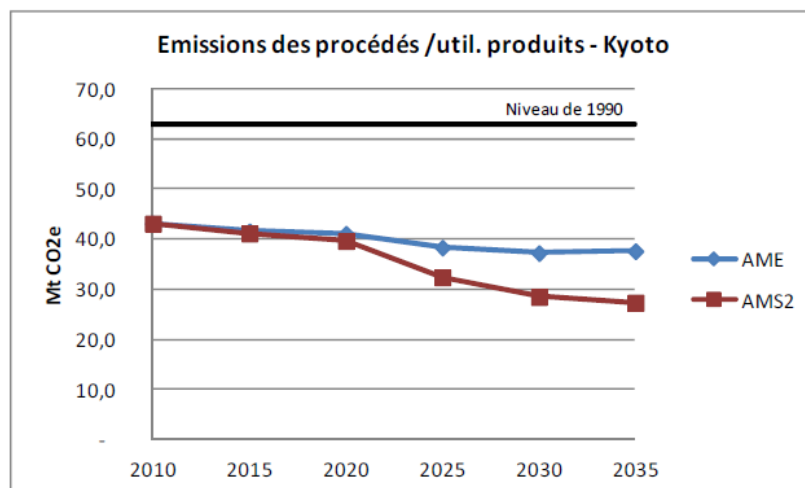
Le rapport « **Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035** »²⁴ commandité par la DGEC et remis en septembre 2015 présente un scénario «AME» avec mesures existantes au 1^{er} janvier 2014 (transmis à la commission européenne), et un scénario «avec mesures supplémentaires» appelé «AMS2». Les données sont présentées sous format conforme au rapportage du protocole de Kyoto, avec par exemple des catégories séparant les émissions dues à la combustion des autres. Outre la France métropolitaine, les DOM sont inclus.

« Le scénario AME indique la trajectoire de la demande d'énergie, de l'offre énergétique, des émissions de GES et de polluants atmosphériques que devraient induire toutes les mesures ayant des impacts sur la demande et l'offre d'énergie ainsi que sur les émissions de GES, effectivement adoptées et mises en œuvre avant le 1^{er} janvier 2014. Le scénario AMS2 («avec mesures supplémentaires» 2) prend en compte la mise en œuvre effective de toutes les mesures prévues dans l'AME ainsi que celles adoptées ou annoncées après le 1^{er} janvier 2014, dont en particulier les mesures et objectifs prévus par la LTECV. Le scénario AMS2 intègre par exemple l'atteinte de l'objectif de réduction de 40% des émissions de GES en 2030 par rapport à 1990, illustre une façon de porter à 32% la part des énergies renouvelables en 2030 (sans préjuger des choix qui seront faits par la PPE), etc. »

Pour l'industrie, qui apparaît très sollicitée dans ces scénarios, les émissions de GES chutent donc entre 1990 et 2030 de 41% (AME) ou 55% (AMS2) hors consommation d'énergie, et de 36 % (AME) ou 54 % (AMS2) pour la composante industrielle de la consommation d'énergie par combustion.

²⁴ http://www.themavision.fr/upload/docs/application/pdf/2016-03/synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne_2016-03-17_17-50-30_662.pdf

Tableau 19 : Emissions de GES au périmètre Kyoto du CRF 2



Emissions de GES des procédés et de l'utilisation de certains produits - Kyoto								
MtCO2e	1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030/1990 (%)
AME	63.0	43.1	41.6	41.1	38.3	37.2	37.6	-41%
AMS2	63.0	43.1	41.2	39.6	32.4	28.5	27.3	-55%

Source : CITEPA

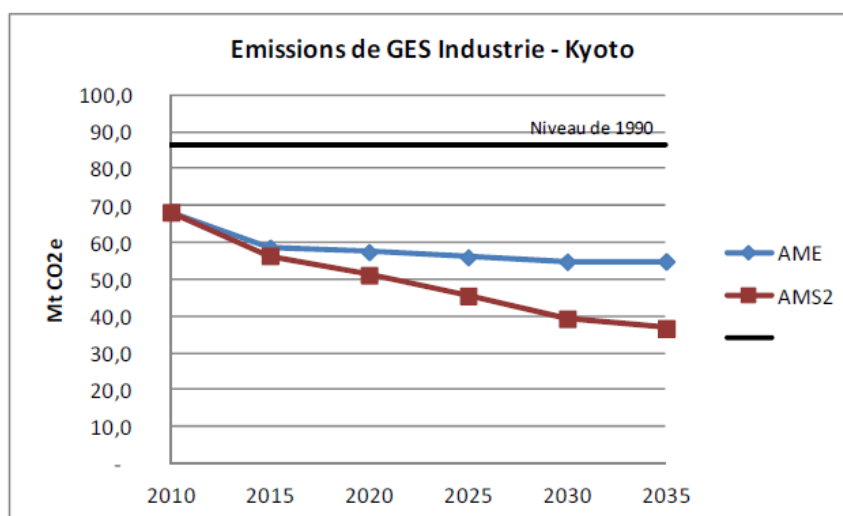
Émi

ssions des procédés industriels - Source : Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035

Les principales activités émettrices correspondant au périmètre ci-dessus (dit CRF 2) des procédés industriels sont la décarbonatation dans la production de produits minéraux (ciment, verre, chaux, etc.), les procédés de la chimie (productions acide nitrique, urée, noir de carbone, hydrogène, etc.), les procédés de la métallurgie (émissions fugitives de la sidérurgie et de l'industrie des métaux non-ferreux), et l'utilisation de substituts des Substances Appauvrissant la couche d'Ozone (SAO) (réfrigération, climatisation, mousses, aérosols, etc.) c'est-à-dire l'utilisation de gaz fluorés.

Les émissions dues aux émissions de la combustion dans les installations fixes (chaudières, turbines, fours) et mobiles (engins mobiles non routier) de l'industrie, ainsi que les émissions de la production d'électricité décentralisée sont:

**Tableau 15 : Emissions de GES au périmètre Kyoto
du CRF 1A2**



MtCO ₂ e	Emissions de GES de l'industrie - Kyoto							
	1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030/1990 (%)
AME	86.3	68.3	58.7	57.4	56.1	54.9	54.9	-36%
AMS2	86.3	68.3	56.5	51.2	45.6	39.4	36.8	-54%

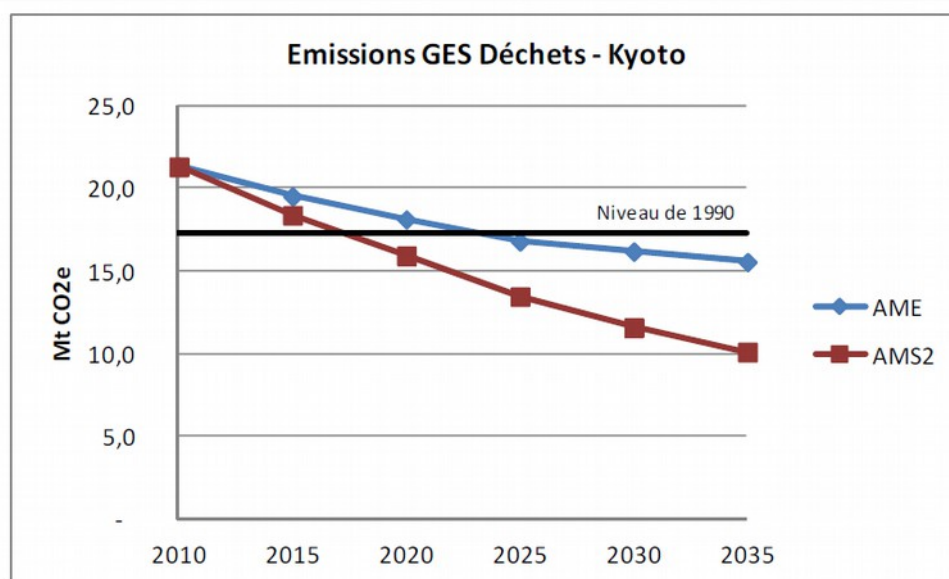
Source : CITEPA

Émissions de la combustion dans les installations fixes industrielles et la production d'électricité décentralisée - Source : Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035

En tout état de cause, les projections avec mesures existantes sont proches des objectifs globaux de -40 % d'émissions de GES à l'horizon 2030 par rapport à 1990. Les projections avec mesures supplémentaires sont proches des trajectoires annoncées par la SNBC pour le secteur industriel à l'horizon 2030. Cependant l'effort résiduel de 2030 à 2050 est plus intense que dans les deux décennies précédentes.

Pour les déchets, les émissions de GES chutent entre 1990 et 2030 de 6% (AME) ou 33% (AMS2). Le scénario AMS2 se caractérise essentiellement par une moindre production de déchets (-6,5 % entre 1990 et 2030) à comparer à une quasi stabilité dans AMS.

Tableau 22 : Emissions de GES au périmètre Kyoto pour le CRF 5



Emissions de GES des déchets- Kyoto								
MtCO ₂	1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030/1990 (%)
AME	17.3	21.3	19.5	18.1	16.8	16.2	15.6	-6%
AMS2	17.3	21.3	18.4	15.9	13.5	11.6	10.1	-33%

Émissions du secteur des déchets - Source : Scénarios prospectifs Energie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035

3.7. Récapitulatif des scénarios post 2013 pour l'industrie

Le tableau ci-après récapitule quelques valeurs des scénarios relatives à l'industrie. Sont rappelées après le tiret oblique « / » les valeurs tous secteurs confondus (production d'énergie, bâtiment, transports, industrie).

Scénario	Conso actuelle (Mtep)	Émission actuelle (MtCO ₂ eq)	Conso 2030 (Mtep)	Émission 2030 (MtCO ₂ eq)	Part EnR 2030 (%)	Conso 2050 (Mtep)	Émission 2050 (MtCO ₂ eq)	Part EnR 2050 (%)
ADEME 2013	36/151 (Valeur 2010 hors conso non énergétique) Métaux primaires 6,2 Chimie 9,1 Matériaux non métalliques 4,6 Industries	129/525 (Valeur 1990) Lié à combustion énergétique 79,9 Lié aux procédés 48,8	33/123 Métaux primaires 6,9 Chimie 8,0 Matériaux non métalliques 4,6 Industries agro-alimentaire	73/313 Lié à combustion énergétique 49,3 Lié aux procédés 23,8		27/82 Métaux primaires 5,6 Chimie 5,9 Matériaux non métalliques 4,3 Industries agro-alimentaire	54/131 Lié à combustion énergétique 35,5 Lié aux procédés 18,8	

	agro-alimentaire 5,2 Equipement 4,0 Mines et construction 2,3 Autres 5,0		2,9 Equipement 3,4 Mines et construction 2,6 Autres 4,8			2,1 Equipement 2,0 Mines et construction 3,1 Autres 3,7		
DEC	37/154		40/142			37/124		9 %
DIV	37/154		38/135			35/118		32 %
EFF	37/154		33/120			27/78		3 %
SOB	37/154		28/110			21/72		22 %
SNBC				68/360 pour années 2024-2028				
Scénario prospectif Énergie – Climat – Air pour la France à horizon 2035 AMS2	155 (Valeur 2012)	Combustion énergétique 60,0 procédés 25,0	29/121	68/317 combustion énergétique 39,4 procédés 28,5				

3.8. Récapitulatif des scénarios post 2013 pour les déchets

Le tableau ci-après récapitule quelques valeurs des scénarios relatives aux déchets. Sont rappelées après le tiret oblique « / » les valeurs tous secteurs confondus (production d'énergie, bâtiment, transports, industrie).

Scénario	Conso actuelle (Mtep)	Émission actuelle (MtCO ₂ éq)	Conso 2030 (Mtep)	Émission 2030 (MtCO ₂ éq)	Part EnR 2030 (%)	Conso 2050 (Mtep)	Émission 2050 (MtCO ₂ éq)	Part EnR 2050 (%)
ADEME 2013	Consommation d'énergie marginale non identifiées	14,4/525 (Valeur 1990)		15,2/313		27/82	7,6/131	

	/151							
SNBC				13/360 pour années 2024-2028				
Scénario prospectif Énergie – Climat – Air pour la France à horizon 2035 AMS2	Consommation d'énergie marginale /155 (Valeur 2012)	21,3/518,3 Valeur 2010		11,6/317				

4. Aspects économiques, problèmes et solutions

4.1. Un secteur assujéti à un système de quotas d'émissions encore peu efficace en raison de surallocations

4.1.1. Le système EU ETS couvre la moitié des émissions de CO₂ de l'UE

Les émissions industrielles de gaz à effet de serre sont principalement constituées de gaz carbonique. Dans le cadre de la CCNUCC et du Protocole de Kyoto, l'UE a décidé d'un système de quotas d'émissions négociables (EU ETS en anglais). Le système EU ETS a été instauré par la directive 2003/87/CE et assure une réduction progressive du plafond d'émissions autorisées de 21 % entre 2005 et 2020 pour 11 000 installations électriques et industrielles européennes. Il couvre les émissions de gaz carbonique (CO₂) des installations grosses émettrices telles que les centrales électriques et les chaufferies, les raffineries de pétrole, les productions de métaux ferreux, de ciment, de chaux, de verre, de matériaux céramiques et de papier. En 2013 le périmètre s'est étendu par l'inclusion de nouveaux secteurs et GES (N₂O, SF₆ de la production chimique et d'aluminium). Désormais « quelques 16 400 installations (responsables de la moitié des émissions de CO₂ de l'UE), et l'ensemble des vols intracommunautaires sont désormais contraints par cette politique. »

La contribution des secteurs couverts par EU ETS, en vue d'atteindre l'objectif de Kyoto de chaque pays, a été déterminé dans un plan national d'allocation de quotas (PNAQ ou NAP – *National Allocation Plan*) qui fixait une limite légale des émissions de ces secteurs pour la période 2008-2012 (seconde période d'application du Protocole). Il convient de noter qu'en attribuant des quotas d'émissions aux secteurs couverts par EU ETS, les États membres déterminent indirectement la limite des émissions de leurs secteurs non couverts par EU ETS. « Pour la troisième période d'application du protocole (2013-2020) l'allocation des quotas est centralisée au niveau de la commission européenne, l'objectif de réduction des émissions des secteurs de l'EU ETS est fixée à -21 % entre 2005 et 2020 soit -1,74 % par an. »²⁵

Ce système a permis de réduire les émissions mais le prix du quota a dramatiquement baissé, notamment en raison du nombre de quotas alloués. En 2013, 900 millions de quotas ont été retirés sur les 16 milliards existants. En 2015 a été créée une réserve de stabilité du marché avec ajustement automatique de la quantité de quotas à partir de 2019. De 30 €/t CO₂ éq. au début du système, le prix est tombé à moins de 6 € fin 2012 et moins de 4€ début 2013 sous l'effet conjugué des efforts d'« efficacité carbone », et de la crise économique provoquant un excédent de quotas en circulation (15 % d'excédents pour la France). Depuis, le prix des quotas est remonté à 7,5 € mi-2015.

Les décharges qui émettent du méthane ne sont pas concernées par le système d'échange des quotas d'émission. En revanche, une taxe générale sur les activités polluantes est perçue sur les déchets mis en décharge, avec une différence de 18€/t de déchets selon que la décharge est équipée d'un dispositif pour récupérer le biogaz (cas de 90 % des tonnages traités aujourd'hui) ou non. Globalement, si la TGAP ne compensait que les externalités liées aux émissions de GES, la TGAP sur les déchets

²⁵ Chiffres clés du climat France et monde, édition 2016, SOeS, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2015/reperes-chiffres-cles-climat-ed-2016.pdf

stockés représentant 293 M€ en 2013 pour des émissions de 14,8 MtCO₂eq conduiraient à un prix de la tonne de CO₂ de près de 20€/tCO₂.

4.1.2. Le débat sur la valeur du carbone

Sur ces questions de valeur du carbone, le rapport « Mobiliser les financements pour le climat »²⁶ remis en juin 2015 par Pascal Canfin et Alain Grandjean propose l'établissement d'un « corridor carbone » avec un prix minimum de 15 à 20 \$/t CO₂ avant 2020 et un prix cible de 60 à 80 \$/tonne CO₂ en 2030/2035. La LTECV²⁷ reprend cette recommandation en l'amplifiant et dispose dans son article 1 alinéa VIII que « Le Gouvernement se fixe pour objectif, pour la composante carbone intégrée aux tarifs des taxes intérieures sur la consommation des produits énergétiques inscrites au tableau B du 1 de l'article 265 du code des douanes, d'atteindre une valeur de la tonne carbone de 56 € en 2020 et de 100 € en 2030 ». Un rapport du CGEDD est mené en 2016 sur cette problématique.

Le rapport sur des « Propositions pour des prix du carbone alignés avec l'accord de Paris²⁸ », sous la responsabilité de Pascal Canfin, Gérard Mestrallet et Alain Grandjean prolonge le rapport précédent. Il a été remis à la ministre chargée de l'énergie le 11 juillet 2016. Ce rapport note un large consensus sur le rôle décisif que peuvent jouer les instruments de tarification carbone et de finance climat, pour enclencher de façon efficace la transition bas carbone. Mais il constate une incohérence entre Accord de Paris, objectifs de l'Union européenne et fonctionnement du marché carbone européen. La surabondance de quotas européens a conduit à un prix très bas (5 €/t CO₂), très inférieur au niveau nécessaire pour que cet instrument ait un rôle incitatif. Par ailleurs la possibilité de report des quotas brouille le signal pour l'avenir. De ce point de vue, un corridor de prix, combiné à une accélération de la réduction des quotas de 1,74 % aujourd'hui à 2,4/2,6 % après 2020, apporterait une amélioration pragmatique. Pour accélérer la sortie de l'utilisation du charbon dans la production française d'électricité, le rapport évoque trois solutions²⁹, et renvoie à des études techniques pour déterminer la plus intéressante : il ne s'agit en particulier pas de substituer à la production française des productions étrangères émettant autant de gaz à effet de serre, que les centrales dont on vise la fermeture et dont on devrait annuler les quotas. Le rapport prône enfin une généralisation d'un prix du carbone dans le monde, visant une tarification en 2020 de 25 % des émissions mondiales. La révision du système d'échange de quotas d'émissions (EU ETS) est en 2016 à l'ordre du jour au niveau européen.

Le 15 juillet 2015 la commission a adopté un projet de révision de la directive 2003/87/CE. Elle propose, pour l'essentiel: d'introduire l'objectif agréé au Conseil européen de réduction des émissions de 43% d'ici à 2030 par rapport à 2005 pour les secteurs couverts par l'EU ETS (industrie, énergie) et de 30 % pour les secteurs non ETS (agriculture, transports, bâtiments, déchets, industrie légère)³⁰. Cela induit une

²⁶ <http://www.carbone4.com/sites/default/files/Rapport%20CANFIN%20GRANDJEAN%20FINAL%2018062015.pdf>

²⁷ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-3.pdf

²⁸ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_mission_12_juillet_19h10.pdf

²⁹ Taxe uniforme sur le secteur électrique, taxe sur les centrales à charbon, norme sur les émissions de gaz à effet de serre des centrales.

³⁰ Cette ambition correspond à peu près à l'ambition de la SNBC, en supposant que l'industrie soumise aux quotas applique effectivement le taux de 43 % de réduction par rapport à 2005. Les entreprises industrielles, qui représentent 75 % des émissions, émettraient un maximum de 49,8 MtCO₂eq. Les autres, qui devront baisser leur émissions de 37 %, 18,3 MtCO₂eq. Soit un total de 68,1 MtCO₂eq, correspondant à ce que prévoit la SNBC et le scénario AMS2.

modification de la réduction annuelle du plafond d'émissions de 1,74%/an à 2,2%/an. D'autres propositions visent à allouer des quotas révisables annuellement sur la base du progrès technologique, pour favoriser l'innovation (fonds d'innovation NER400 de 400 M€ faisant suite au NER300); mettre en place un fonds pour l'innovation en faveur des technologies bas carbone au bénéfice des pays de l'UE dont les revenus sont les plus bas ; poursuivre l'allocation gratuite de quotas à titre transitoire au secteur électrique et mettre en place un fonds de modernisation des systèmes énergétiques; enfin mettre en place des dispositions visant à protéger l'industrie contre un risque de fuite de carbone. Au total 57% des quotas doivent être mis en enchères, tandis que 43% seront alloués à titre gracieux, couvrant 30% ou 100% des émissions.

Concernant la proposition française d'un corridor de prix, la Commission s'est montrée peu réceptive jusqu'à présent, préférant les approches basées sur les quantités plutôt que sur les prix.

Elle a notamment décidé comme mesure de court terme de différer la mise aux enchères de 400 Mt CO₂ en 2014, 300 Mt CO₂ en 2015 et 200 MTCO₂ en 2016 ; A plus long terme, elle a décidé de créer une réserve pour assurer la stabilité du marché (MSR – *Market Stability Reserve*).

Le 20 juillet 2016, la Commission a complété ses propositions pour ce qui ne relève pas du secteur ETS, pour laquelle elle vise une réduction de 30 % des émissions en 2030 par rapport à 2005. Ponctuellement, les pays ont la possibilité de comptabiliser comme réductions des annulations de quotas du secteur SQE auxquelles ils procèdent. De même, ils peuvent dans une certaine mesure utiliser les absorptions totales nettes provenant du secteur UTCF.

Le parlement européen, de son côté, reprend la proposition du Royaume-Uni et de la France pour une approche graduée, mais pas les propositions de Mécanisme d'Inclusion Carbone (MIC³¹), corridor de prix, harmonisation des coûts indirects. Au niveau de l'ambition, le rapporteur propose de revoir le facteur de réduction linéaire tous les 5 ans à partir de 2023.

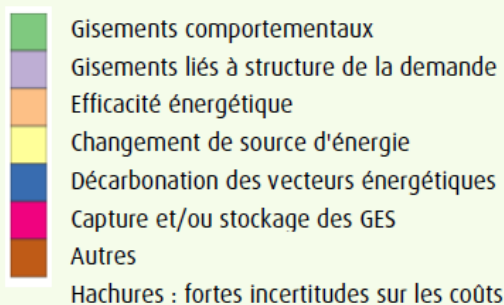
Le rapport CGEDD « Facteur 4 » de 2013 était favorable à un renforcement du système de quotas adopté en 2009, à la vente aux enchères des quotas, à une répartition adéquate des mises aux enchères pour assurer un soutien du prix, à une extension aux consommations diffuses de combustibles et carburants fossiles. Le constat reste valable aujourd'hui.

4.2. Trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût – juin 2016

Une note du **CGDD « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût »**, dont un projet a été consulté en juin 2016 par la mission, présente des courbes dynamiques d'abattement moyen des émissions de GES permettant de quantifier les impacts et coûts de mesure, par secteur ou de manière intégrée.

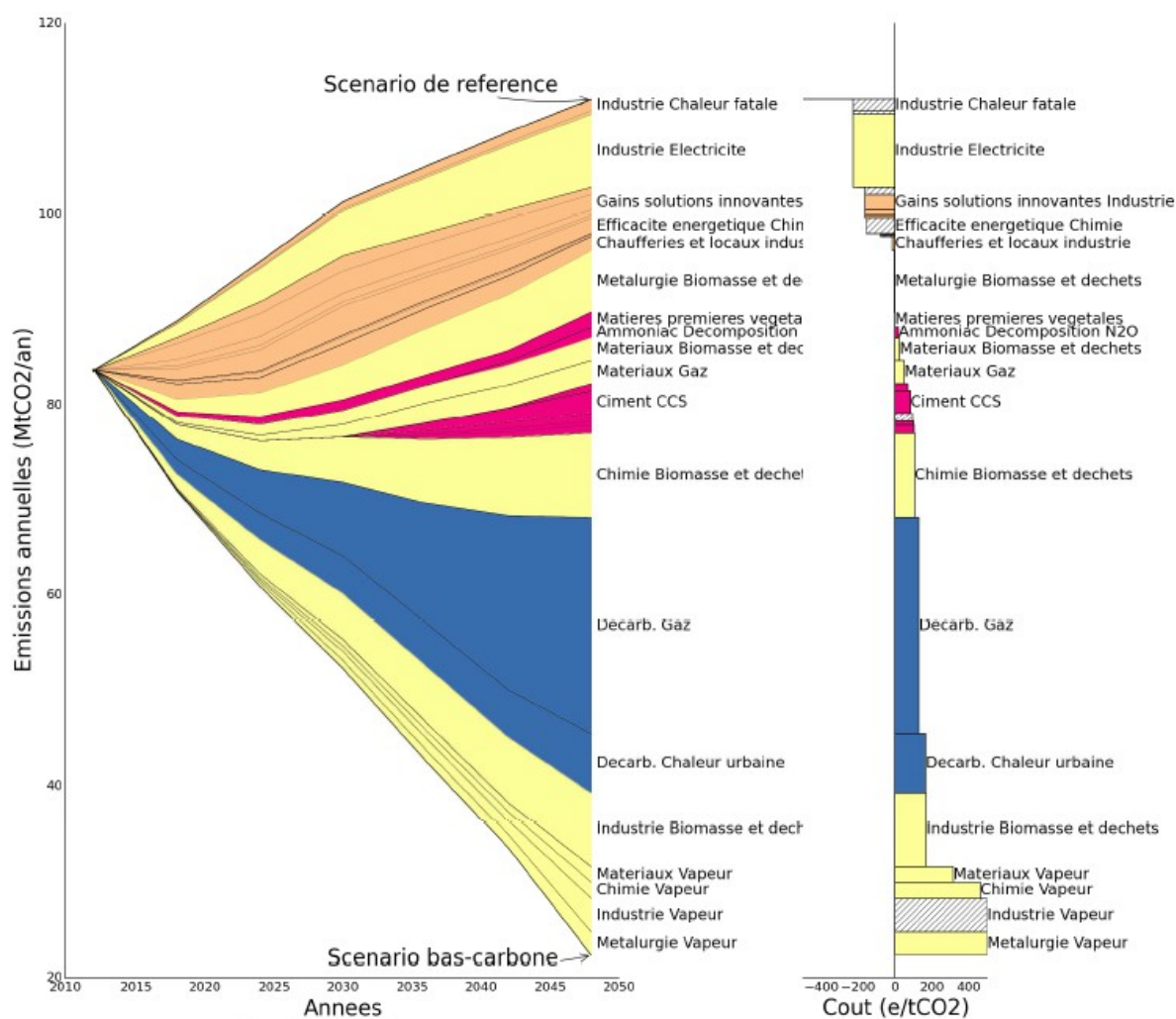
³¹ Cf http://www.senat.fr/doslegman/4_pages_carbone.pdf : « Ce mécanisme consiste à intégrer dans le marché du carbone les produits fabriqués en dehors de l'Union européenne et relevant des secteurs exposés à des risques de délocalisation. On peut également parler d'un ajustement carbone aux frontières. Par exemple, les importateurs d'acier devraient acquérir des quotas dans une proportion correspondant au contenu carbone des produits importés. »

Encadré 4 : Code couleur utilisé pour l'ensemble des figures



Pour l'industrie les résultats sont :

Figure 14 Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Industrie



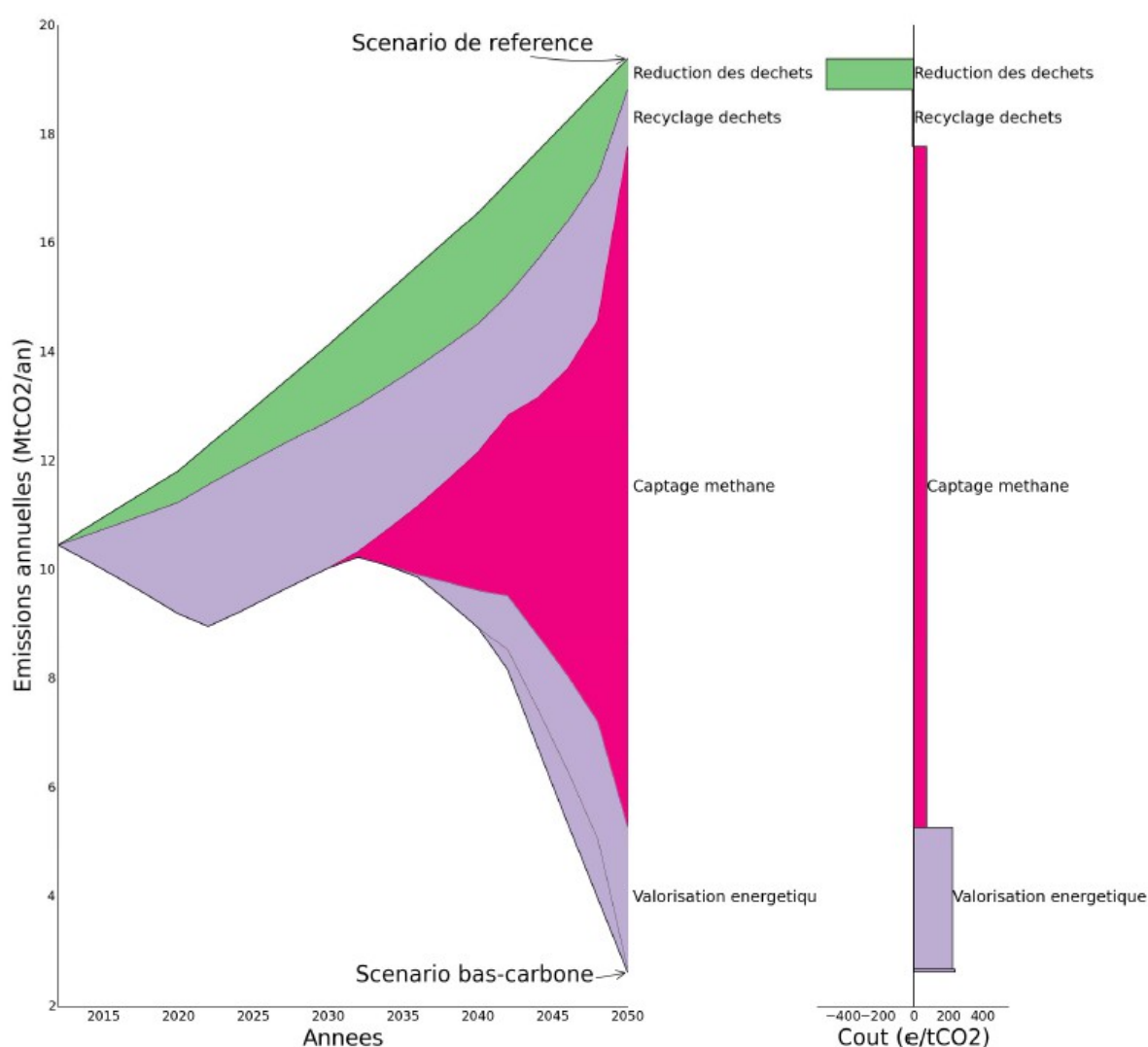
Source: trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût, CGDD, 2016

La décarbonation du gaz et de la chaleur urbaine, ainsi que le changement vers des sources d'énergies décarbonées (électricité, biomasse), l'innovation et l'efficacité énergétique font partie des mesures à plus fort impact. Pour mémoire, la priorisation

des mesures proposées par la SNBC est « par ordre de priorité décroissante ou chronologique : l'efficacité énergétique pour maîtriser la demande en énergie et en matière par produit; le recyclage, la réutilisation et la récupération d'énergie pour diminuer la consommation d'énergie et de matière; la substitution énergétique afin de diminuer la part des énergies fortement émettrices dans la consommation industrielle et dans les matériaux; le développement et le déploiement de la capture et du stockage du carbone (CSC) à long terme, afin de réduire l'intensité en GES des énergies et des procédés. ». Le recouvrement des priorités n'est pas parfait, ce qui est sans doute inévitable en raison d'hypothèses de calcul sans doute différentes.

Et pour le secteur des déchets, qui représente entre 3 et 4 % des émissions de GES entre 1990 et 2030 dans les scénarios de la SNBC, on a les courbes d'abattement suivantes:

Figure 9 Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme - Déchets



Source: trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût, CGDD, 2016

À moyen terme la réduction des déchets et le recyclage, à long terme l'augmentation du taux de capture du méthane en décharge (de 40 % à 77%) et la valorisation énergétique des déchets non recyclés, sont les mesures d'impact important. La projection à long terme est donc dépendante d'une technologie encore peu mûre.

5. Les initiatives des industriels – une mobilisation mondiale

Dans la logique prônée lors de la préparation de l'accord de Paris, les acteurs non gouvernementaux se mobilisent pour réfléchir à la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre et aux actions qu'ils pourraient avoir dans ce domaine. C'est notamment le cas des industriels.

Le 2ème sommet entreprises et climat a réuni, à Londres les 28 et 29 juin 2016, sept cents décideurs économiques représentant plus de six millions d'entreprises. Il a notamment examiné le rapport « *the business end of climate change* »³² qui liste des actions possibles et cherche à en estimer les résultats à échéance 2030.

Les actions possibles ont trait :

- à la fixation d'objectifs basés sur une approche scientifique (cohérence de l'action avec des objectifs de réchauffement limités à 2°C, objectifs à 5/15 ans, en valeur absolue et relative, ..) ;
- à une multiplication par deux de l'efficacité énergétique ;
- au recours à des énergies renouvelables ;
- à l'absence de déforestation ;
- à la mise en place de partenariats.

Le rapport indique qu'il faut passer mondialement d'une émission de 61 à 42 Mds de t en 2030. Les engagements des gouvernements permettent de diminuer de 6 Mds les émissions industrielles. Les engagements des entreprises permettent de les diminuer de 4,2 Mds supplémentaires, si les entreprises signataires et celles qui seront mobilisées réalisent ce qu'elles ont promis, mais de 10 milliards si tout le monde s'engage.

Les scénarios d'efficacité énergétique ou de recours au renouvelable paraissent assez optimistes s'agissant de l'industrie française. La coalition des entreprises pour la tarification du carbone a tenu sa 2ème réunion à Paris le 10 juin 2016. Elle réunit plus de 90 entreprises et 15 gouvernements. Elle vise à développer la tarification carbone et s'interroge sur l'emploi des recettes correspondantes qui est un des moyens de favoriser cette tarification ;

Le « business dialogue » est une enceinte de haut niveau réunissant industriels et gouvernements. Elle propose que chaque entreprise rédige une contribution volontaire à l'image de ce que font les États dans le cadre de l'accord de Paris. Dans son dernier document, ce groupe insiste sur les méthodes de mesure des émissions, la transparence et la tarification du carbone.

³² Voir <http://www.businessendofclimate.org/>

6. Zoom sur quatre branches clés et parangonnage avec l'industrie britannique

La mise en regard de travaux britanniques et des travaux de l'ADEME sur les quatre branches clés identifiées *supra* (chimie, minéraux non métalliques, métallurgie des métaux ferreux et agro-alimentaire) aboutit aux résultats présentés *infra*.

Il convient par avance de noter que la vision 2030-2050 de l'ADEME ne prend pas en compte des technologies encore incertaines (comme la capture et la séquestration du carbone) auxquelles recourent amplement les travaux britanniques.

6.1. Branche chimie

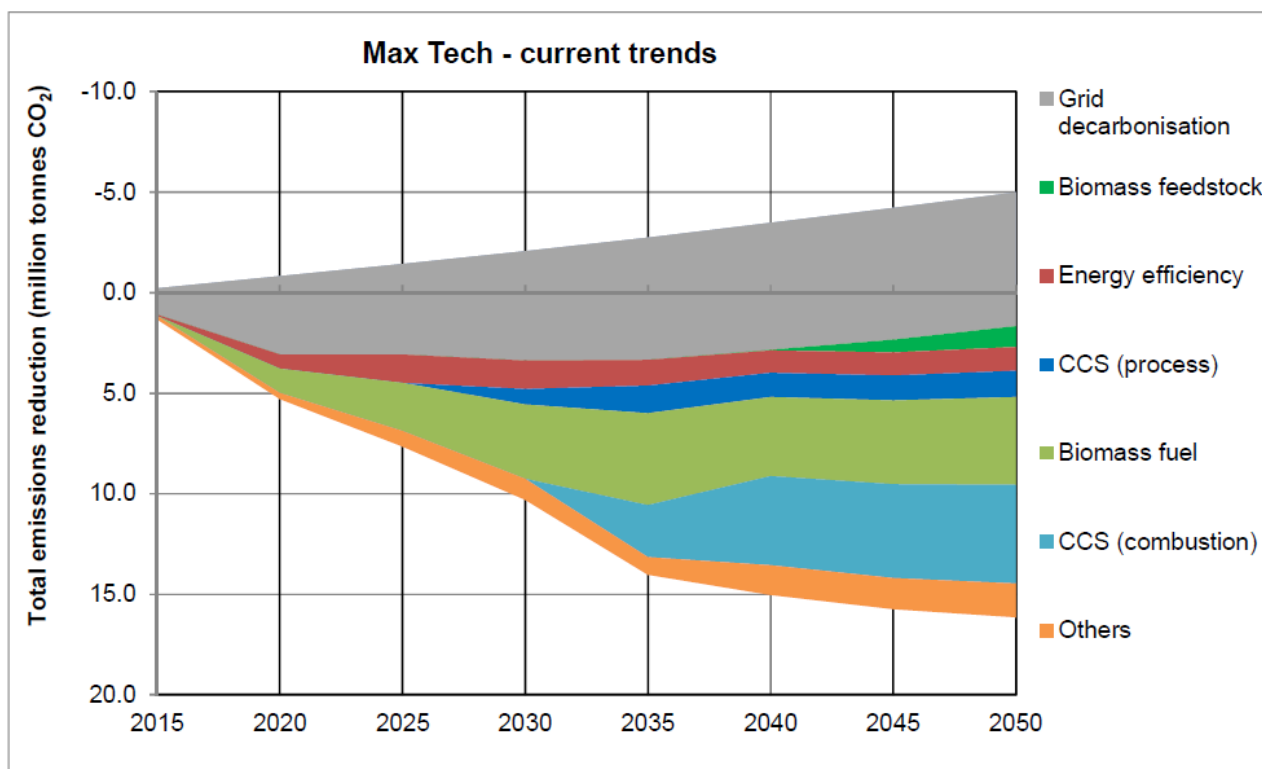
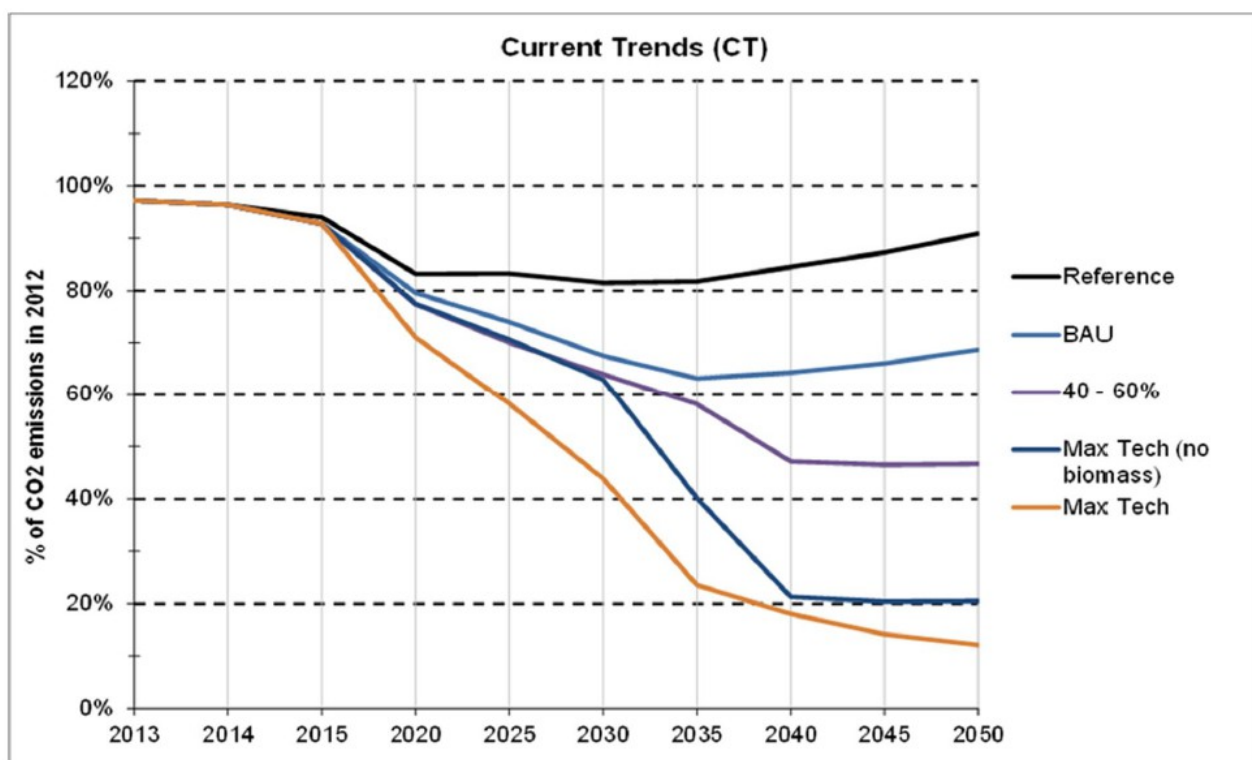
L'ADEME³³ table sur un gain d'efficacité énergétique de 18 % d'ici 2030 (par tonne produite) et répète ce gain d'efficacité énergétique entre 2030 et 2050. L'évolution des productions est contrastée suivant les produits (moins de chlore, plus d'éthylène et d'ammoniac). La consommation énergétique du secteur passe ainsi de 9,11 Mtep (2010) à 8 Mtep (2030) et 5,9 Mtep (2050). Trois autres facteurs jouent sur la diminution des émissions, le recours à des produits renouvelables comme source de molécules carbonées (chimie du végétal) ainsi que le recours à des produits de récupération (recyclage des plastiques), enfin l'évolution des sources d'énergie (recours à des énergies moins carbonées et notamment la combustion de biomasse). La contribution de ces différents facteurs à la diminution des émissions n'est pas détaillée. Pour rappel, la réduction d'émissions de GES de l'industrie (métropolitaine) par rapport à 1990 selon le scénario ADEME est de 43 % en 2030 (-36 % pour la combustion, -62 % pour les processus) et de 58 % en 2050 (-38 % pour la combustion, -51 % pour les processus). Pour mémoire, les émissions de la chimie en France métropolitaine en 2014 étaient de 23,2 MtCO₂eq contre 53,8 MtCO₂eq en 1990 soit une baisse de 57 %³⁴. En 20 ans, de 1990 à 2010 les émissions ont baissé de moitié, la production de l'industrie manufacturière ayant, elle, baissé environ de 10 %.

Le Royaume-Uni, dans le cadre de ses travaux sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre, a publié une feuille de route pour la branche chimie³⁵ qui représentait 18,4 MtCO₂eq en 2012 (soit un peu moins que la branche chimie en France). La feuille de route estime que l'on peut parvenir à une diminution d'un facteur 5 par rapport à la situation actuelle en ayant recours à tout ce qu'il est possible de mettre en œuvre. Les solutions retenues sont celles évoquées ci-dessus (efficacité, intrants renouvelables, recyclage, combustible biomasse), auxquelles il faut ajouter le regroupement d'industries (*clustering*) partageant énergie et sous-produits (dans une approche d'économie circulaire) et surtout la capture et séquestration du carbone. Parmi les sources d'énergies moins carbonées, le rapport fait une mention spéciale pour la décarbonation du méthane.

³³ Voir http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/85536_vision_2030-2050_document_technique.pdf. Le périmètre est celui de la métropole.

³⁴ http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/SECTEN/SECTEN-Fichiers_avril2016.zip

³⁵ Voir https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416669/Chemicals_Report.pdf



Source : Ministère de l'énergie et du changement climatique britannique –
Feuille de route pour la decarbonation de l'industrie et l'efficacité énergétique –
Chimie (2015)

Le rapport souligne néanmoins plusieurs contraintes, la longue durée de vie des installations industrielles (20 ans) qui freine leur renouvellement, les difficultés à trouver le financement d'investissements estimés entre 600 millions et 4 milliards de

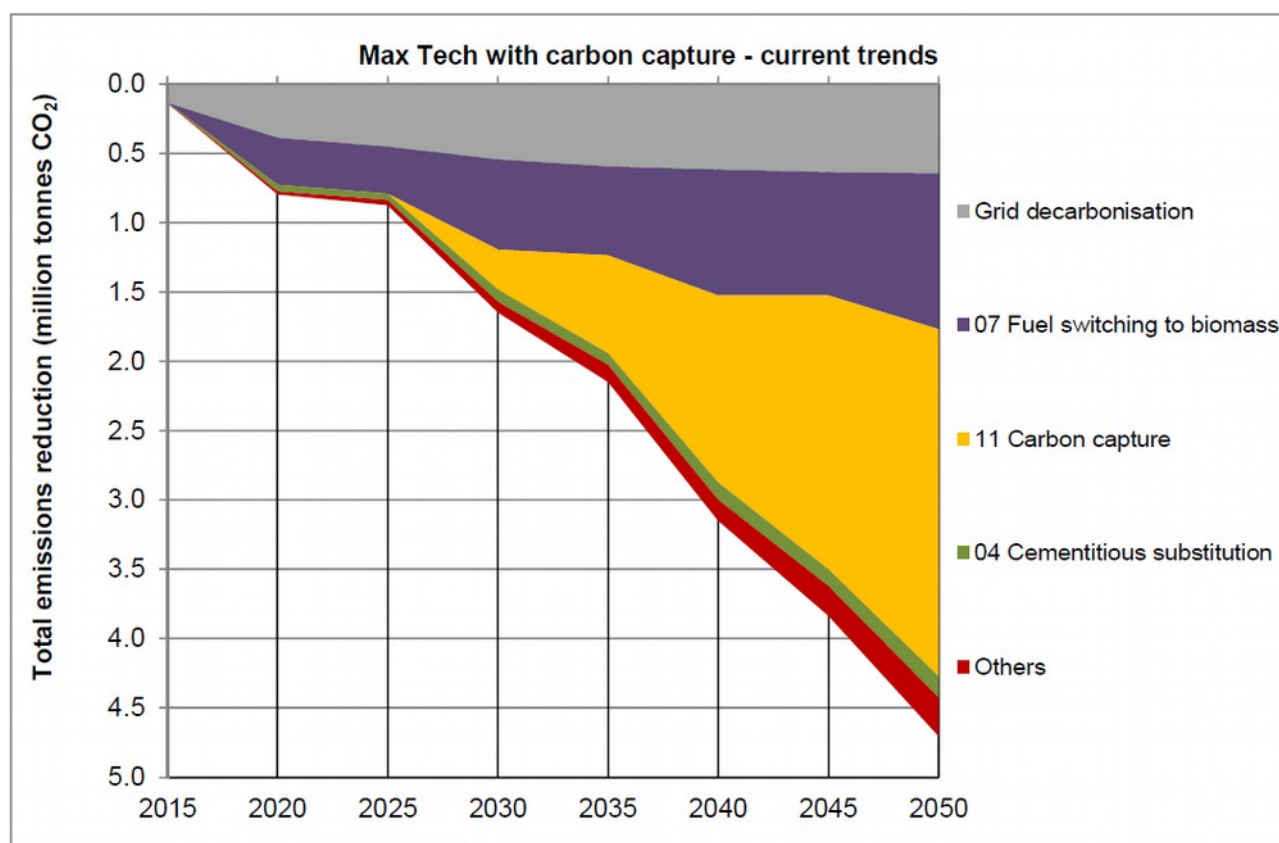
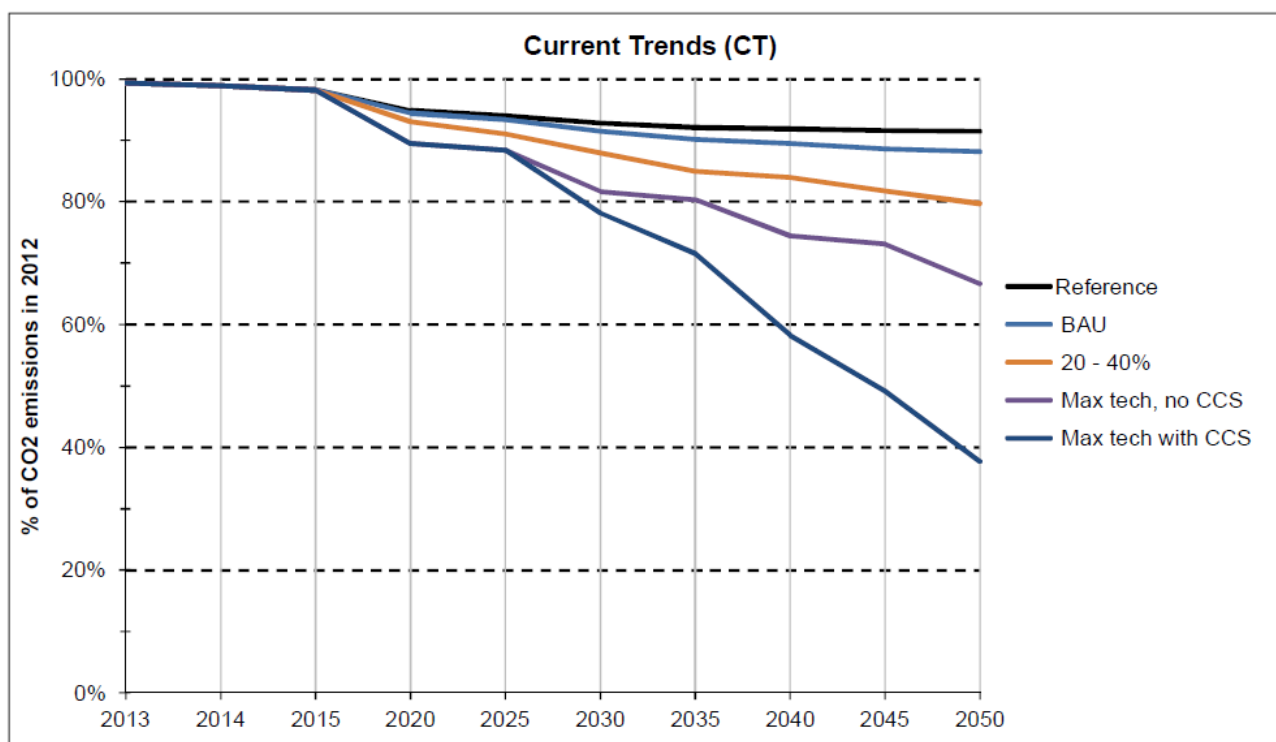
livres, la difficulté à mobiliser la biomasse requise. On peut y ajouter les incertitudes liées aux technologies de capture et séquestration de carbone.

6.2. Branche minéraux non métalliques et matériaux de construction

L'ADEME table sur un gain d'efficacité énergétique de 19,4 % d'ici 2030 et répète ce gain d'efficacité énergétique entre 2030 et 2050. Les productions augmentent : celle de clinker passe de 14,9 Mt en 2010 à 16,5 Mt en 2030, celle de verre de 4,63 Mt en 2010 à 6,35 Mt en 2030. La consommation énergétique du secteur passe ainsi de 4,56 Mtep (2010) à 4,6 Mtep (2030) et 4,3 Mtep (2050). L'évolution des sources d'énergie (recours à des énergies moins carbonées, notamment aux déchets) est une autre piste mentionnée dans le rapport qui évoque un potentiel de 6TWh pour le secteur cimentier correspondant grosso modo aux 0,5 Mtep (soit 5,8 TWh) des combustibles solides de récupération (CSR). Pour la production de verre, un recours accru au verre recyclé est envisagé. Pour mémoire, les émissions métropolitaines de la branche « minéraux non métalliques et matériaux de construction » sont passées de 29,9 MtCO₂eq en 1990 à 18,7 MtCO₂eq en 2014 soit une baisse de 38 %.

Le Royaume-Uni, dans le cadre de ses travaux sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre, a publié des feuilles de route pour les branches ciment, verre et céramiques³⁶ qui représentaient respectivement 7,5, 2,2 et 1, 3 MtCO₂eq en 2012 (soit sensiblement moins que la branche française correspondante). La feuille de route estime que l'on peut parvenir à une diminution d'un facteur 2,5 pour le ciment et la céramique, et 10 pour le verre par rapport à la situation actuelle en ayant recours à tout ce qu'il est possible de mettre en œuvre. Les solutions retenues sont celles évoquées ci-dessus, auxquelles il faut ajouter la capture et séquestration du carbone (qui représente l'essentiel du potentiel de réduction, suivi par le recours à la combustion de biomasse) et des ciments à formulations modifiées. Les graphes ci-dessous évoquent les améliorations apportées pour le secteur du ciment.

³⁶ Voir
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416674/Cement_Report.pdf,
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416675/Glass_Report.pdf,
https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416676/Ceramic_Report.pdf



Source : Ministère de l'énergie et du changement climatique britannique _
Feuille de route pour la decarbonation de l'industrie et l'efficacité énergétique –
Ciment (2015)

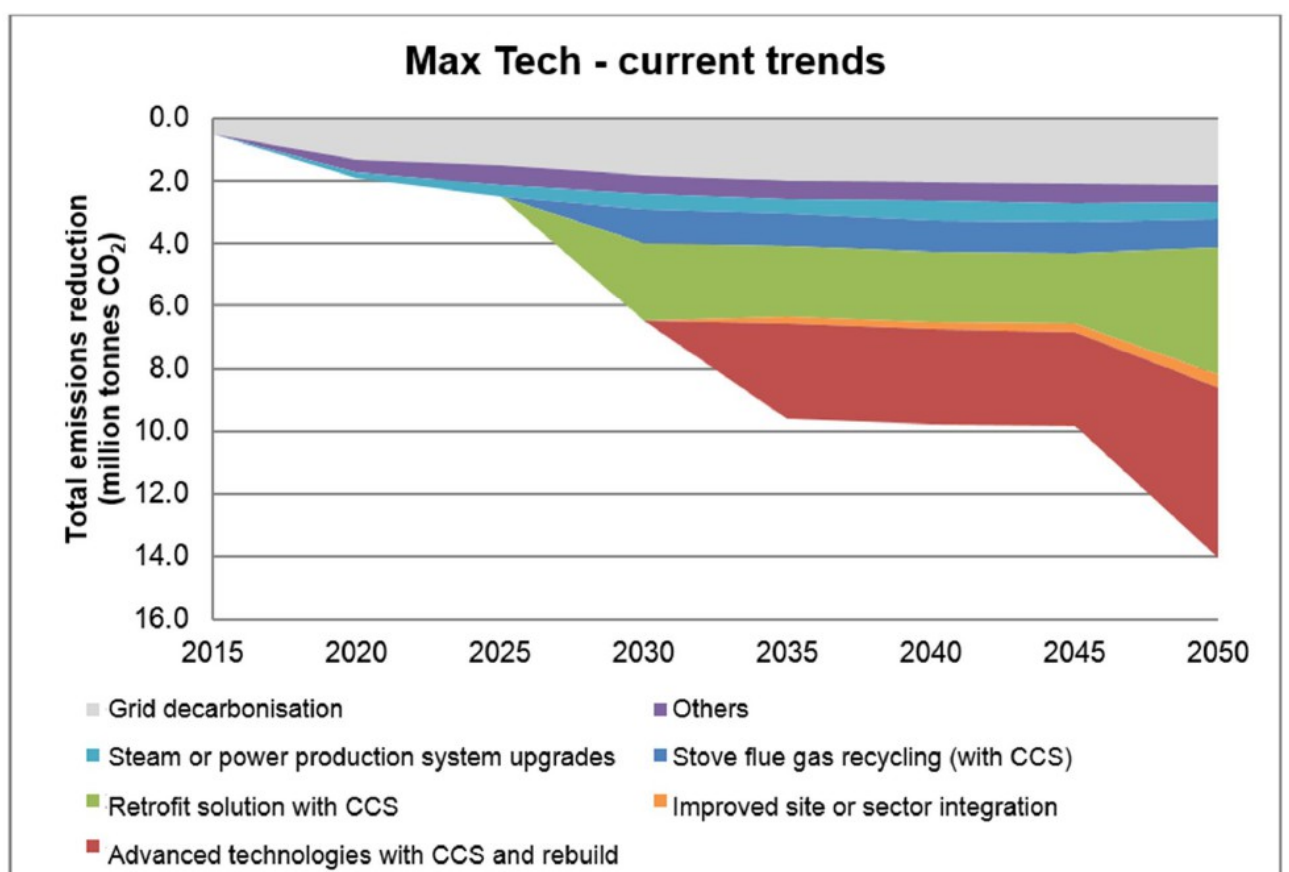
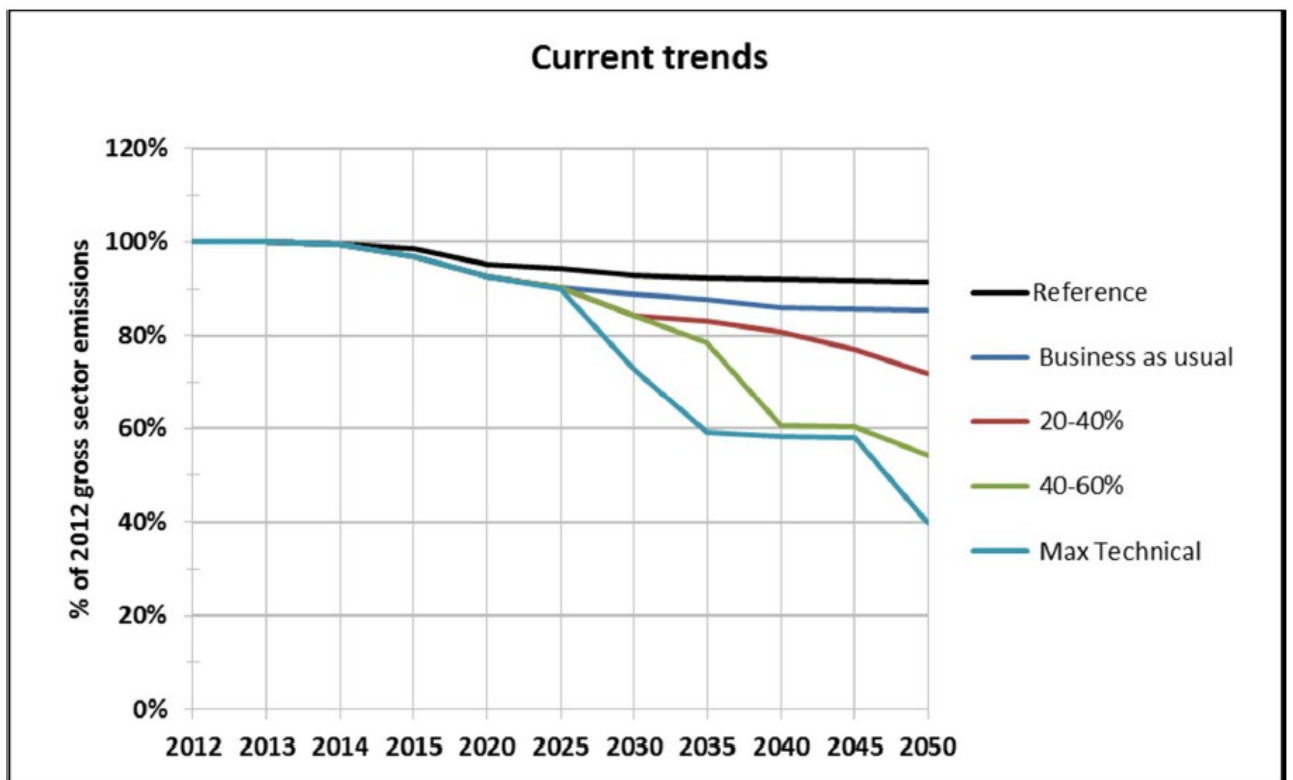
Le rapport souligne néanmoins plusieurs contraintes, la longue durée de vie des installations industrielles (40 ans) qui freine leur renouvellement, les difficultés à trouver le financement d'investissements estimés entre 300 et 600 millions de livres pour le ciment, le caractère très exposé à la concurrence mondiale du secteur, les incertitudes relatives à la capture et au stockage du CO₂.

6.3. Branche production de métaux ferreux

L'ADEME table sur un gain d'efficacité énergétique de 7,5 % d'ici 2030 et répète ce gain d'efficacité énergétique entre 2030 et 2050. La production d'acier prévue augmente, de 15,4 Mt en 2010 à 21 Mt en 2030 et 19 Mt en 2050. La consommation énergétique du secteur (tous métaux) passe ainsi de 6,2 Mtep (2010) à 6,9 Mtep (2030), puis 5,6 Mtep (2050). Deux autres facteurs jouent sur la diminution des émissions, le recours à des produits de récupération (recyclage des métaux) et l'évolution des sources d'énergie (recours à des énergies moins carbonées). La contribution de ces différents facteurs à la diminution des émissions n'est pas détaillée. Pour mémoire, les émissions métropolitaines de la branche « production de métaux ferreux » sont passées de 27,4 MtCO₂éq en 1990 à 18,7 MtCO₂éq en 2014 soit une baisse de 32 %.

Le Royaume-Uni, dans le cadre de ses travaux sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre, a publié une feuille de route pour la branche fer et acier³⁷ qui représentait 22,8 MtCO₂éq en 2012 (soit un tiers de plus que la branche métaux ferreux en France). La feuille de route estime que l'on peut parvenir à une diminution d'un facteur 2,5 par rapport à la situation actuelle en ayant recours à tout ce qu'il est possible de mettre en œuvre. Les solutions mises en œuvre sont celles évoquées ci-dessus, auxquelles il faut ajouter le regroupement d'industries (*clustering*) partageant énergie et sous-produits et la capture et surtout la séquestration du carbone. Parmi les sources d'énergies moins carbonées, le rapport fait une mention spéciale pour la production de chaleur à partir d'électricité non carbonée.

³⁷ Voir https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416667/Iron_and_Steel_Report.pdf



Source : Ministère de l'énergie et du changement climatique britannique _
Feuille de route pour la décarbonation de l'industrie et l'efficacité énergétique –
Fer et acier (2015)

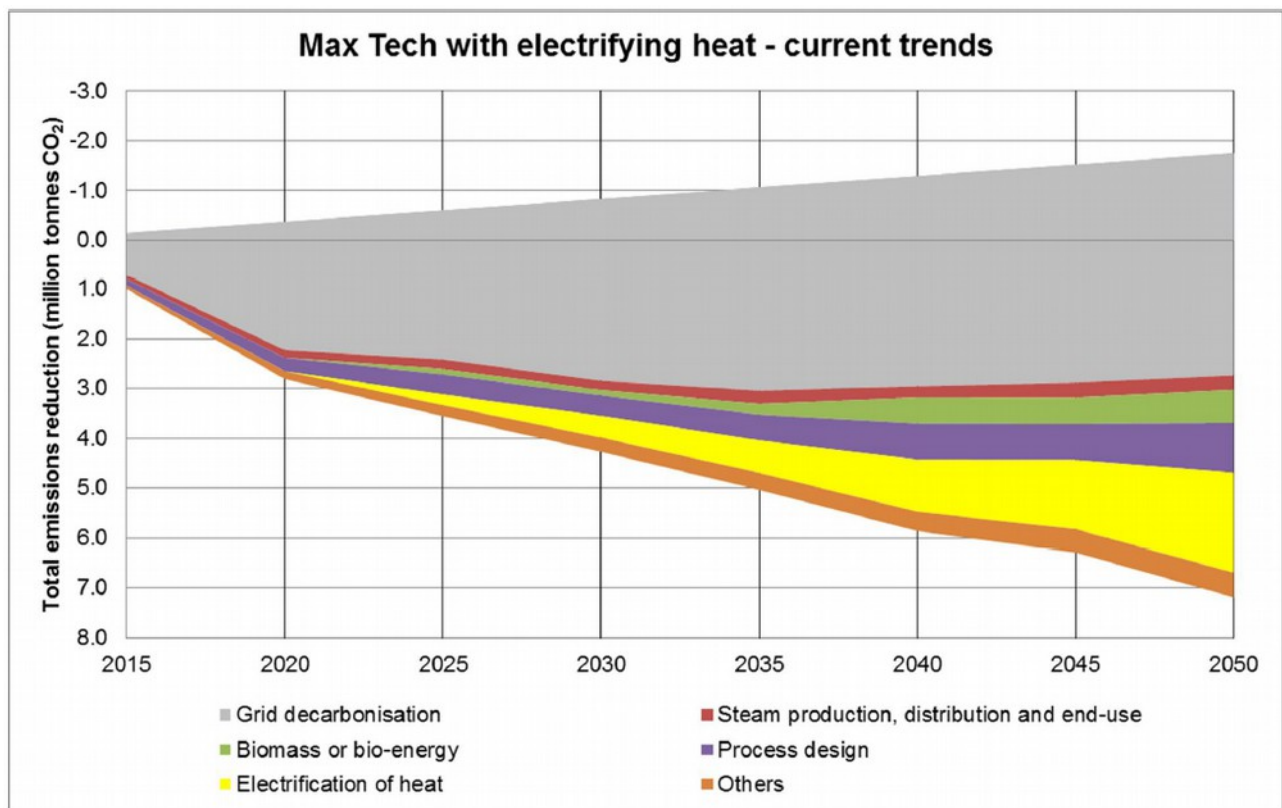
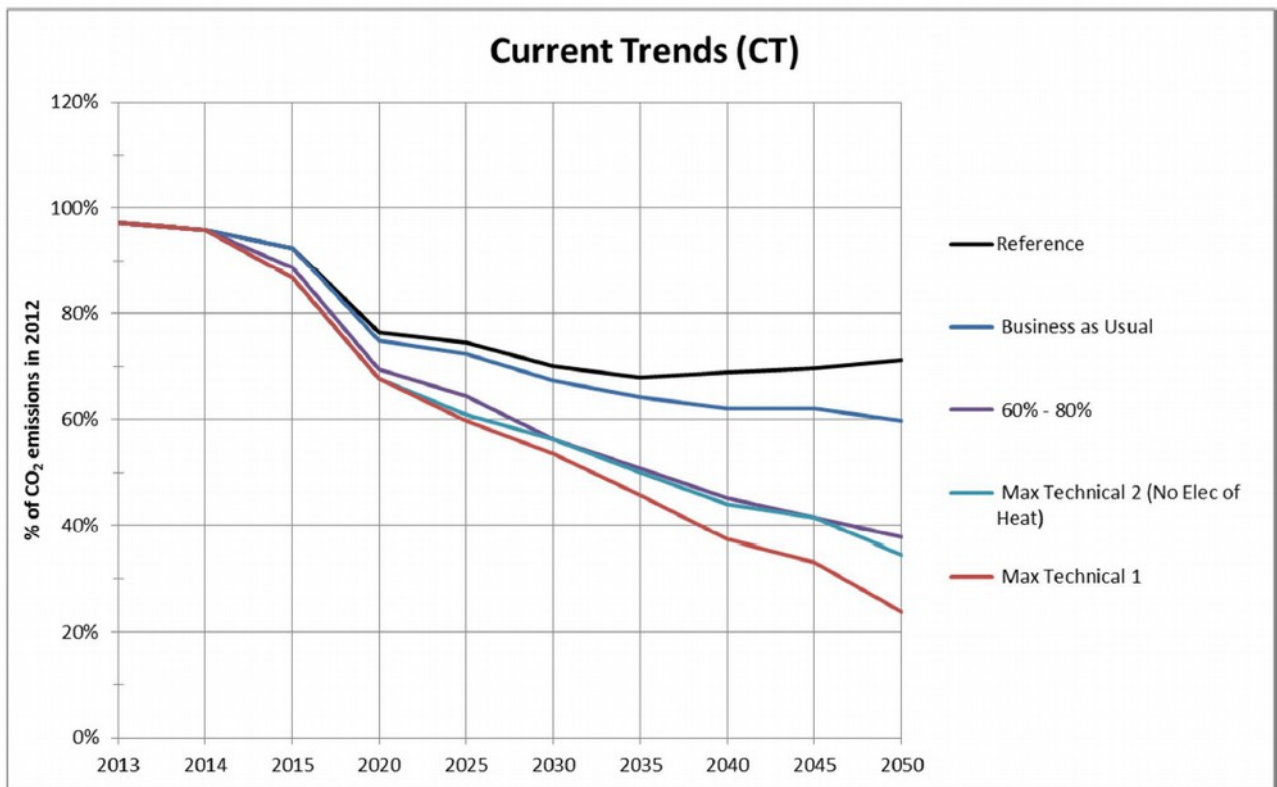
Le rapport souligne néanmoins plusieurs contraintes, la longue durée de vie des installations industrielles (40 ans voire plus) qui freine leur renouvellement, les difficultés à trouver le financement d'investissements estimés entre 400 et 600 millions de livres, le caractère très exposé à la concurrence mondiale du secteur.

6.4. Industries agro-alimentaires

L'ADEME table sur un gain d'efficacité énergétique de 29,4 % d'ici 2030 et répète ce gain d'efficacité énergétique entre 2030 et 2050. Il s'y ajoute une diminution de la production de quelques produits comme le sucre, en cohérence avec l'évolution des pratiques nutritionnelles. La consommation énergétique du secteur passe ainsi de 5,21 Mtep (2010) à 2,9 Mtep (2030) puis 2,1 Mtep (2050). Un autre facteur joue sur la diminution des émissions, l'évolution des sources d'énergie (recours à des énergies moins carbonées). La contribution de ce dernier facteur à la diminution des émissions n'est pas détaillée. Pour mémoire, les émissions métropolitaines de la branche « industries agro-alimentaires » sont passées de 9,1 MtCO₂éq en 1990 à 8,9 MtCO₂éq en 2014 soit une baisse de 2 %.

Le Royaume-Uni, dans le cadre de ses travaux sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre, a publié une feuille de route pour la branche nourriture et boissons³⁸ qui représentait 9,5 MtCO₂éq en 2012 (soit un peu moins que la branche agro-alimentaire en France). La feuille de route estime que l'on peut parvenir à une diminution d'un facteur 5 par rapport à la situation actuelle en ayant recours à tout ce qu'il est possible de mettre en œuvre. Les solutions retenues sont celles évoquées ci-dessus, auxquelles il faut ajouter le regroupement d'industries (*clustering*) partageant énergie et sous-produits et la capture et séquestration du carbone. Parmi les sources d'énergies moins carbonées, le rapport fait une mention spéciale pour la production de chaleur à partir d'électricité non carbonée pour les basses températures. Il mentionne également la lutte contre le gaspillage.

³⁸ Voir https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416672/Food_and_Drink_Report.pdf



Source : Ministère de l'énergie et du changement climatique britannique _
Feuille de route pour la decarbonation de l'industrie et l'efficacité énergétique –
Nourriture et boissons (2015)

Le rapport souligne néanmoins plusieurs contraintes, la longue durée de vie des installations industrielles (30 ans) qui freine leur renouvellement, les difficultés à

trouver le financement d'investissements estimés entre 2 et 13 milliards de livres, la difficulté à mobiliser la biomasse requise.

6.5. Conclusion du parangonnage – des potentiels de réduction très différents selon les hypothèses prises, un tendanciel prometteur mais sans doute encore insuffisant en l'absence de technologies de rupture

Les importants potentiels de décarbonation proposés par l'étude britannique dans l'industrie manufacturière et les quatre branches étudiées *supra* dépendent majoritairement de technologies de capture et séquestration du carbone (encore incertaines, et non prises en compte dans l'étude ADEME), de décarbonation de l'électricité (dont le potentiel est plus important au Royaume-Uni qu'en France), et de combustion de la biomasse.

Les facteurs de réduction de 2,5, voire 5 ou 10, entre aujourd'hui et 2050, présentés par l'étude britannique, sont donc fortement dépendants du recours à ces technologies. Par contraste, l'étude ADEME se focalise plus sur la consommation d'énergie et est beaucoup plus conservatrice avec des réductions de 15 à 60 % d'ici 2050, soit au maximum un facteur 2 ou 3.

Enfin on constate que les émissions de l'industrie française ont grosso été divisées par 2 entre 1990 et 2010 avec un impact limité de la baisse de production industrielle.

7. Synthèse pour le secteur de l'industrie

7.1. Un potentiel de réduction variable mais parfois considérable, notamment en cas de capture et stockage du carbone / CSC

Le potentiel de réduction des émissions de GES par l'industrie, affiché tant par des scénarios prospectifs que par les objectifs implicites à long terme qui sous-tendent la stratégie nationale bas carbone, est variable, mais peut être considérable. Pour la vision prospective 2030-2050 de l'ADEME par exemple c'est un facteur 2,7 (sans capture et stockage du carbone) ; pour le comité « trajectoire » de 2012 ou la SNBC de 2015 il ne s'agit pas d'un facteur 4, mais d'un facteur 5 (comme les orientations 2050 de la SNBC qui constatent une réduction de 27 % entre 1990 et 2013 et visent une division par 4 entre 2013 et 2050) voire 7 (avec capture et stockage du carbone, comme le postule le comité « trajectoire »).

7.2. Utilité d'un prix du carbone et du mécanisme européen de transfert ETS

Certains attendus du rapport de 2013 restent valables. À l'horizon 2050, un prix croissant du carbone sera un moteur utile voire nécessaire pour aider à la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique autrement non prioritaires, modifier les modes de production et les productions elles-mêmes, à condition évidemment que les distorsions aux frontières n'encouragent pas les délocalisations. Les industriels se prononcent d'ailleurs pour un prix du carbone. Sans prix du carbone, le temps de retour des investissements d'économie d'énergie ou de substitution d'énergie est souvent trop important pour qu'ils puissent être facilement retenus.

De ce point de vue, le mécanisme de l'ETS joue un rôle majeur. Il représentait pour la France en 2013 114,5 MTCO₂éq. réparties sur 1151 installations appartenant à la fois à la branche énergie (46 MTCO₂éq et environ 200 sites) et à la branche industrie (167,5 MTCO₂éq et environ 950 sites)³⁹. Il concerne donc 75 % des émissions de la branche industrie. Il est essentiel, pour qu'il joue le rôle incitatif qu'il devait avoir dans l'esprit de ses concepteurs, que les quotas attribués ne soient pas trop largement dimensionnés et que le prix des quotas reflète une valeur correcte du prix du carbone.

L'ETS a cherché à résoudre au travers des mécanismes d'allocation de quotas, payante ou gratuite suivant la question la question des fuites de carbone, c'est-à-dire les délocalisations des industries fortement concurrencées au niveau mondial dont la compétitivité serait affaiblie par un prix du carbone. C'est effectivement une préoccupation mise en avant par les industriels qui constitue un frein à la réduction des émissions.

La TGAP devrait refléter le prix des externalités liées aux gaz à effet de serre.

³⁹ Le tableau des émissions 2013 figure sur le site <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Emissions-verifiees-de-2013-et.html>

7.3. Privilégier les réductions d'émission rapportées à la production

Les projections de réduction sont rendues difficiles par la corrélation des émissions avec la production et l'activité économique. On peut avoir de bonnes réductions d'émissions (diminution des émissions à production équivalente ou supérieure) et de moins bonnes réductions (délocalisation de la production dans un pays où les émissions unitaires sont supérieures).

7.4. Utilité d'une approche par branche

Les possibilités de réduction ne sont pas exactement les mêmes suivant les branches, même si elles s'appuient sur les mêmes leviers, économie d'énergie et valorisation de la chaleur, substitution des énergies émettrices de CO₂ par des énergies moins émettrices, recyclage et matériaux de base moins carbonés. Dès lors, il est intéressant d'avoir des approches de branche, et de demander aux industriels des visions à moyen terme de ce qu'il est possible de faire en matière d'économie d'énergie, de modification de source d'énergie, de récupération de chaleur. La concentration des émissions sur un nombre limité de sites (les 20 plus gros sites représentent environ 30 MtCO₂eq sur 87) milite pour une approche ciblée sur les gros émetteurs, sans oublier les autres.

7.5. Rôle décisif des technologies de rupture

La capture et le stockage géologique du carbone sont un important moteur de réduction, prévu dans les scénarios les plus ambitieux, mais qui nécessite une fiabilisation tant technique qu'économique. Cela milite pour un approfondissement des études relatives à ce sujet.

Plus généralement, la division des émissions de GES par quatre et plus dans le secteur industriel, retenue par les scénarios les plus volontaristes, semble difficile à atteindre en l'absence de ruptures technologiques (capture du carbone, puis surtout dans la séquestration du carbone mais aussi forts gains d'efficacité énergétique), et organisationnelles (augmentation du recyclage et avènement d'une économie industrielle circulaire).

Il se pourrait également que ces ruptures soient liées à des ruptures comportementales dans la consommation, en lien avec l'économie circulaire. On peut imaginer des objets mieux conçus, durant plus longtemps, partagés pour certains d'entre eux, donc produits en moins grande quantité et émetteurs de moins de GES, mais cela imposerait de changer le modèle économique de l'industrie.

En l'absence de telles ruptures et avec des améliorations prévisibles sans recours au CCS voire CCUS (carbon capture utilization and sequestration), l'on s'achemine plutôt vers des réductions d'émissions du secteur au mieux de l'ordre de 2,5 ou 3 en 2050 par rapport à 1990.

Recommandation du rapport 2013 concernant le secteur de l'industrie

9. Dans l'attente d'un éventuel accord international prévoyant la mise en place de nouveaux mécanismes contraignants pour réduire les émissions de GES, le système européen de quota d'émission de GES (SCEQE) est le seul système communautaire d'incitation à la réduction des émissions utilisant un signal prix. La France doit apporter son plein soutien au renforcement adopté en 2009, à la vente aux enchères des quotas, à une répartition adéquate des mises aux enchères pour assurer un soutien du prix. Le SCEQE pourrait efficacement élargir la couverture des émissions de CO₂ par extension aux consommations diffuses de combustibles et carburants fossiles.

Depuis 2013 le périmètre du SEQE s'est étendu à l'inclusion de nouveaux secteurs et gaz à effet de serre, quelque 16 400 installations et l'ensemble des vols intra-communautaires sont désormais contraints par cette politique. Une réforme du système a été proposée avec pour objectif d'aboutir à des prix des quotas incitatifs. Mais dans le domaine des transports terrestres, un système de taxation est sans doute préférable à l'instauration de quotas. La dernière partie de la recommandation ne semble plus d'actualité



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

Annexe thématique sur le parangonnage international UE, Royaume-Uni, Allemagne, Californie, Chine

Rapport n° 008378-02
établi par

Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF (coordonnateur), Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT

Février 2017



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités
passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction
de ce rapport.

Sommaire

Introduction.....	3
1. Union Européenne.....	5
1.1. Des émissions en décroissance régulière.....	5
1.2. Des engagements ambitieux, assurés à court terme mais pour l'instant hors d'atteinte au-delà.....	7
1.2.1. Émissions ETS et ESD.....	7
1.2.2. L'objectif de 2020 (-20 % par rapport à 1990) sera dépassé.....	10
1.2.3. Des projections de réduction en 2030 de 27 % à 30 %, en deçà de l'objectif de 40 % par rapport à 1990.....	11
1.2.4. Le programme NER 300.....	14
1.2.5. La communication de novembre 2015 de la Commission Européenne sur l'état de l'Union de l'énergie.....	15
1.2.6. Propositions récentes pour 2030.....	16
1.2.7. Une feuille de route pour un facteur 5 en 2050.....	16
1.3. Conclusion.....	23
2. Royaume-Uni.....	25
2.1. Des évolutions récentes essentiellement dues au secteur de l'énergie.....	25
2.2. Des objectifs carbone qui requièrent de nouvelles politiques et mesures.....	28
2.2.1. Une stratégie de budgets carbone quinquennaux de plus en plus ambitieux.....	29
2.2.2. Un réalisé encourageant en 2015 mais insuffisant pour 2030.....	30
2.2.3. Des politiques actuelles insuffisantes pour tenir les objectifs des budgets carbone à moyen terme.....	31
2.2.4. Des politiques et mesures supplémentaires nécessaires.....	34
2.3. Le rapport DDPP 2015 sur le Royaume-Uni.....	36
2.4. Le scénario de référence de l'UE 2016.....	43
2.5. Conclusion.....	44
3. Allemagne.....	45
3.1. Des émissions de GES stables voire en croissance.....	45
3.2. Des objectifs ambitieux difficiles à tenir.....	47
3.2.1. Les objectifs du plan « Energiekonzept » : -40 % en 2020 par rapport à 1990, -55 % en 2030, -80 à 95 % en 2050 ; et les mesures afférentes.....	48
3.2.2. Programme d'action « Klimaschutz 2020 » lancé fin 2014 afin d'assurer l'objectif compromis de 2020.....	51
3.3. Le rapport DDPP sur l'Allemagne.....	54
3.4. Le plan d'action « Klimaschutz 2050 » en retrait.....	60
3.5. Conclusion.....	61
4. Californie.....	62
4.1. Des émissions stables.....	62
4.1.1. Des émissions par habitant élevées, mais de moitié inférieures à celles du reste du pays.....	62

4.1.2. Des émissions sectorielles dominées par les transports, l'industrie et la production d'énergie.....	63
4.1.3. Des émissions stables depuis 1990 et en décroissance depuis 2008.....	64
4.2. Des objectifs de réduction modérés pour 2020 mais identiques à ceux de l'UE pour 2030 avec un objectif de facteur 5 pour 2050.....	65
4.2.1. La loi de 2006 vise à ramener les émissions de 2020 au niveau de 1990.....	65
4.2.2. Une ambition récente aligne la Californie sur les objectifs de réduction européens.....	74
4.3. Conclusion.....	77
5. Chine.....	78
5.1. Des émissions incertaines mais en forte croissance.....	78
5.2. Des engagements significatifs, indexés sur la croissance, non contraignants.....	82
5.3. Le rapport DDPP sur la Chine.....	84
5.4. Conclusion.....	87
Conclusion.....	88

Introduction

Le rapport du CGEDD en date de 2013 sur le facteur 4 présentait en trois pages un « essai de parangonnage avec l'Allemagne et le Royaume-Uni ».

Le présent rapport d'actualisation complète ce travail avec des données plus récentes et examine aussi la situation de l'Union Européenne, de l'État américain de Californie, et de la Chine. Il mentionne aussi les travaux du DDPP (deep decarbonization pathway project), projet fondé en 2013 par le réseau des solutions pour le développement durable des Nations Unies, en anglais *United Nations Sustainable Development Solutions Network* (SDSN) et l'institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI)

Pour rappel le tableau suivant récapitule les ordres de grandeur des principales données d'émissions de ces États et entités ainsi que de la France.

	Union Européenne	Allemagne	Royaume-Uni	Californie	Chine	France
Émissions GES 1990 sans (avec) UTCF (MtCO ₂ éq)	5 669 MtCO ₂ éq	1 248 (1215)	807 (811)	433 (427)	3 500 environ	548 (517)
Émissions GES 2013 sans (avec) UTCF (MtCO ₂ éq)	4 471 MtCO ₂ éq	951 (935)	576 (570)	444	11 000 environ	486 (433)
Population actuelle (M hts)	508 millions d'habitants	81	65	38	1 354	66
Émissions GES 2013 hors UTCF/ht (tCO ₂ éq/ht)	8,8 tCO ₂ éq / habitant	11,7	8,9	11,7	8,5	7.4

Tableau 1 : Statistiques d'émissions des États et entités considérés¹

¹ Sources: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/sbi/eng/21.pdf> , <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6/assessment>, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Californie#Population> , <http://www.arb.ca.gov/cc/inventory/inventory.htm>, <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/carbon-emissions-report-2015-final.pdf> , <http://climateactiontracker.org/countries/china.html>, <http://fas.org/sqp/crs/row/RL34659.pdf> ; les données chinoises sont arrondies faute de données récentes ou fiables, le seul inventaire étant de 1994 et donnant 4 060 MtCO₂éq, actualisé en 2007 et donnant pour 2004 des émissions de 6 100 MtCO₂éq ; l'AIE estimait les émissions chinoises en 2005 à 7 527 MtCO₂éq. Ces données reflètent essentiellement les émissions de CO₂ liées à l'énergie. Données françaises issues du rapport CCNUCC 2016 http://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/CCNUCC_france_2016_indB.pdf

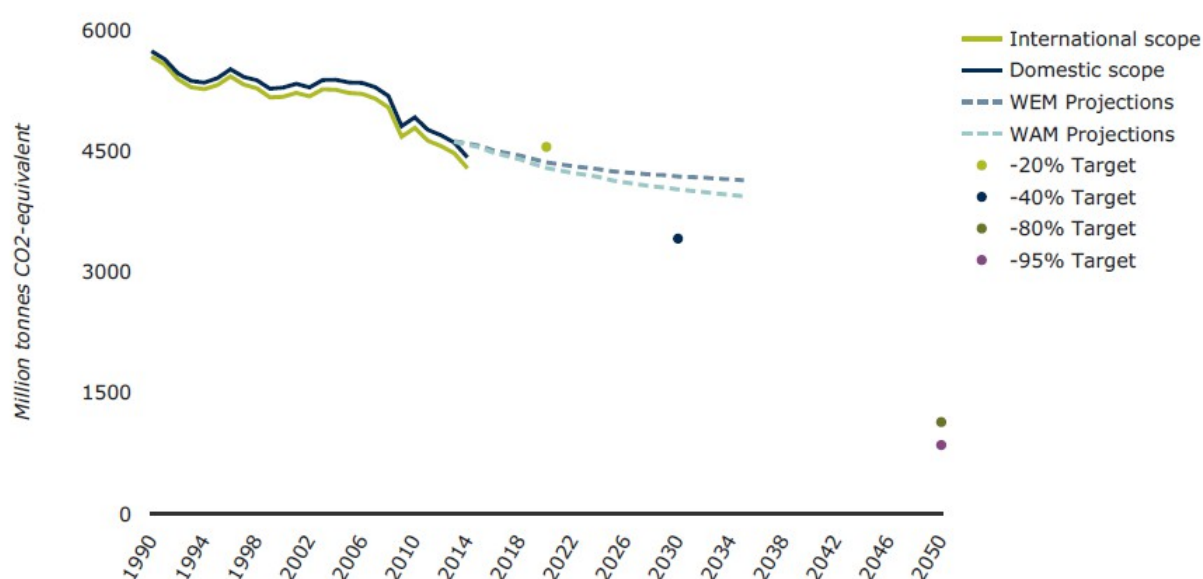
1. Union Européenne

1.1. Des émissions en décroissance régulière

Les émissions de l'union européenne en 2014 étaient de 4 286 MtCO₂éq dans le périmètre dit « international » qui exclut (comme la plupart des statistiques) les vols intérieurs, et 4 421 MtCO₂éq dans le périmètre dit « domestique » qui inclut les vols intérieurs.

Les évolutions récentes indiquent une décroissance régulière de ces émissions, qui s'est accélérée après la crise financière de 2008.

Chart — Historic and projected greenhouse gas emissions trends



Notes: WEM: with existing measures, WAM: with additional measures.

In 'International scope', GHG totals do not include emissions from Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) and international bunker fuels, in line with the UNFCCC inventory reporting guidelines.

In 'Domestic scope', international aviation is included in the totals, in line with EU legislation.

All emission trends refer to EU28. The geographical scope of the United Kingdom is consistent with the coverage of the country under the Kyoto Protocol.

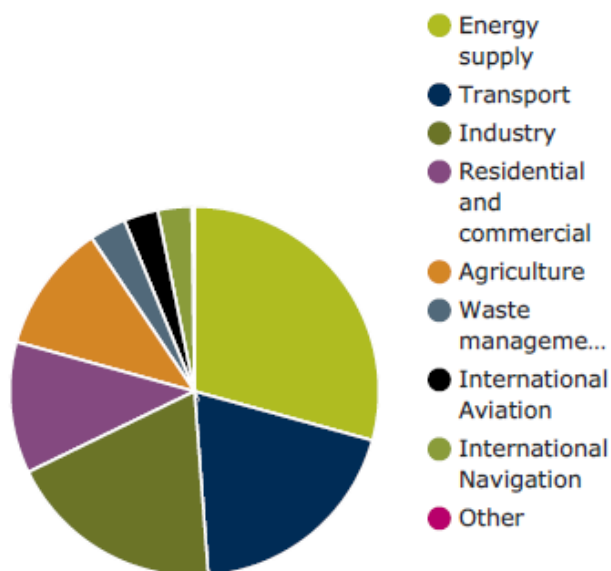
Émissions de GES dans l'union européenne – Source, agence européenne de l'environnement, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6/assessment>

En 2014, les émissions de gaz à effet de serre de l'UE représentaient 77,05 % des émissions de 1990.²

² <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=en&pcode=tsdcc100&plugin=1>

La répartition des émissions par secteurs en 2014 est la suivante : 29,3 % pour la production d'énergie, 19,5 % pour les transports, 19 % pour l'industrie, 11,5 % pour les bâtiments résidentiels et commerciaux, 11,3 % pour l'agriculture, et le reste également réparti entre gestion des déchets, aviation internationale et navigation internationale.

**Emissions share per main sectors
in 2014 – Sectoral greenhouse
gas emissions by IPCC sector**



*Ventilation des émissions de GES de l'Union Européenne par secteur –
source, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6/assessment>*

Les émissions par habitant de l'Union Européenne ont décru de 12 tCO₂éq/habitant en 1990 à 9 tCO₂éq/habitant en 2012³. Elles sont de 8,8 tCO₂éq/ht en 2013.

Sur la base du chiffre de 2013 8,8 t/CO₂/ht cité plus haut, cette répartition aboutit à des émissions de :

- 2,6 t pour l'énergie ;
- 1,7 t pour les transports ;
- 1,7 t pour l'industrie ;
- 1,0 t pour le résidentiel tertiaire ;
- 1,0 t pour l'agriculture.

³ <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/Latvia/1/LV-03-06-EU%20INDC.pdf>

1.2. Des engagements ambitieux, assurés à court terme mais pour l'instant hors d'atteinte au-delà

Les engagements européens à court et moyen terme sont décrites par les paquets « énergie-climat » de 2020 (adopté en 2009) et 2030 (révisé en 2014), et impliquent une réduction des émissions de 14 % en 2020 par rapport à 2005, ce qui correspond à une réduction de 20 % en 2020 par rapport à 1990 ; et une réduction de 40 % en 2030 par rapport à 1990 (voir figure précédente). L'objectif ultime étant un facteur 5 à l'horizon 2050.

Les engagements de l'UE au titre de la COP21⁴ sont cohérents avec ces ambitions : l'INDC (*intended nationally determined contribution*) de l'UE, intention de contribution de l'union européenne à l'effort international de mitigation du réchauffement climatique, est de réduire en 2030 d'au moins 40 % par rapport à 1990 les émissions de gaz à effet de serre. Les émissions par habitant de l'Union Européenne ont décliné de 12 tCO₂eq/habitant en 1990 à 9 tCO₂eq/habitant en 2012, l'objectif de 2030 correspond à des émissions de 6 tCO₂eq/habitant.

1.2.1. Émissions ETS et ESD

Les émissions de l'UE sont réparties en deux parties : les émissions dues aux gros émetteurs, assujetties au système EU ETS (*European Union emissions trading scheme*), et les émissions hors ETS, dites ESD (*effort sharing decision*), qui recouvrent le reste.

Chart — EU Trends in ETS and non-ETS emissions



ETS: Emissions trading scheme. 2005–2012 ETS emissions take into account adjustments related to the change in scope between 2005–2007 (first trading period) and 2008–2012 (second trading period), and the temporary exclusion of installations during the first trading period.

⁴ <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/Latvia/1/LV-03-06-EU%20INDC.pdf>

Émissions de GES dans l'union européenne: ETS et ESD (c'est à dire hors ETS)– Source, agence européenne de l'environnement, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6/assessment>

1.2.1.1. L'EU ETS et le marché du carbone

« L'EU ETS impose depuis 2005 un plafond d'émissions à environ 11 400 installations des secteurs de l'énergie et de l'industrie, responsables de près de 50 % des émissions de CO₂ de l'Union européenne. Depuis 2013, le périmètre s'étant étendu par l'inclusion de nouveaux secteurs et gaz à effet de serre, quelques 16 400 installations et l'ensemble des vols intra-communautaires⁵ sont désormais contraints par cette politique. Ces installations doivent restituer chaque année autant de quotas (1 quota = 1 tonne de CO₂) que leurs émissions vérifiées de l'année précédente. Depuis 2008, elles sont également autorisées à utiliser une quantité de crédits Kyoto (URCE ou URE, voir le glossaire) limitée en moyenne à 13,5 % de leur allocation entre 2008 et 2012. Ce seuil est pratiquement atteint.»⁶.

Les quotas (ou EUA : *European Union allowances*, en français permis -d'émettre- de l'Union européenne) sont échangeables de gré à gré ou sur des places de marché électroniques. Leur prix, compris entre 10 et 15€/tCO₂éq de 2009 à 2011, a chuté en 2011 et 2012 et tourne autour de 5 à 10€ depuis 2013. Cette chute s'explique par un surplus de quotas surplus lui-même occasionné par la crise économique (avec de moindres émissions que prévues, ce qui rend superflus nombre de droits d'émissions) et l'afflux de crédits internationaux occasionnés par des opérations de mise en œuvre conjointe de réduction d'émissions dans le cadre des mécanismes du protocole de Kyoto. Ce surplus est en cours de résorption par la réduction des volumes de quotas mis aux enchères en 2014, 2015 et 2016 (« *backloading* » de 900 millions de quotas sur 2014-2016) et par la mise en place en 2018 d'une réserve de stabilité (MRS : *market stability reserve*).⁷

La réforme de l'ETS actuellement envisagée vise à résorber le surplus de quotas, et d'augmenter la part de quotas non gratuits. Par ailleurs il est actuellement prévu un fonds de l'innovation, successeur du programme NER300 (cf. *infra*) qui sera doté de 400 millions de quotas pour financer à partir de 2021 (et 50 millions de quotas en cas de démarrage avant 2021) des démonstrateurs bas carbone (énergie renouvelable, capture et séquestration de carbone, industrie à basse intensité énergétique).

⁵ l'aviation a été incluse dans l'EU ETS depuis 2012, mais son périmètre a varié : en 2012 les émissions dues à l'aviation étaient de 84 MtCO₂éq, mais suite au changement de périmètre elles sont passées à 53 MtCO₂éq en 2013 et 55 MtCO₂éq en 2014, selon <http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2015>

⁶ Chiffres clés du climat France et monde, édition 2016, SoeS, http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2015/reperes-chiffres-cles-climat-ed-2016.pdf ; URE veut dire unité de réduction des émissions, unité de transaction pour la mise en œuvre conjointe (MOC, en anglais JI joint implementation) de projets réducteurs d'émissions ; URCE veut dire Unité de réduction certifiée des émissions, unité de transaction du mécanisme de développement propre (MDP, en anglais CDM clean development mechanism), avec des projets réducteurs d'émissions, mais sur pays tiers en développement

⁷ http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/reform/index_en.htm

1.2.1.2. L'ESD et les politiques nationales

L'ESD établit pour chaque État membre des cibles annuelles d'émissions pour les émissions non couvertes par l'EU ETS, à savoir notamment les transports (hors aviation et commerce maritime international), bâtiments, agriculture et déchets. Ces cibles valent pour la période 2013-2020⁸. Afin de soutenir les États-membres dans leurs réductions d'émissions, un important corpus législatif et réglementaire, spécialisé par secteur, a été mis en place :

Main sector(s) targeted	EU legislation	Issue
Non-ETS; cross-cutting	Directive 2006/32/EC	End-use efficiency and energy services
Transport	Directive 2003/30/EC	Biofuels
Transport	Directive 2006/28/EC	Infrastructure charging for heavy goods
Transport	Directive 2006/40/EC	Mobile air conditioning
Transport	Regulation (EC) No 443/2009 and Regulation (EU) No 333/2014	CO ₂ from cars
Transport	Directive 2009/33/EC	Clean and energy-efficient road transport
Transport	Regulation (EU) No 510/2011 and Regulation (EU) No 253/2014	CO ₂ from vans
Residential, transport	Directive 2009/28/EC	Promotion of use of renewable energies in heating and transport
Residential, cross-cutting	Directive 2012/27/EU	Energy efficiency
Residential	Directive 2010/31/EC	Energy performance of buildings
Residential	Regulation (EU) No 813/2013	Ecodesign legislation for space heaters and combination heaters
Residential	Regulation (EU) No 814/2013	Ecodesign legislation for water heaters and storage tanks
Agriculture	Directive 2000/60/EC	Water Framework Directive
Agriculture	Regulations related to Common Agricultural Policy (CAP)	Agricultural measures
Industrial processes	Regulation (EC) No 842/2006 and Regulation (EU) No 517/2014	F-gas regulation
Waste	Directive 1999/31/EC	Landfill
Waste	Directive 2000/76/EC	Waste incineration
Waste	Directive 2008/98/EC	Waste

Source: EEA, 2015.

Principales politiques de l'Union Européenne en soutien de l'atteinte des objectifs nationaux au titre de l'ESD – source, Source, « Trends and projections in Europe », agence européenne de l'environnement, 2015, http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2015/at_download/file

La commission européenne a plus récemment présenté le 20 juillet 2016 un paquet législatif pour accélérer les réductions d'émissions dans le secteur ESD (voir *infra*).⁹

1.2.1.3. Des objectifs plus ambitieux pour l'ETS que pour l'ESD

Pour la fraction ETS des émissions, la réduction demandée est de 21 % en 2020 par rapport à 2005, et 43 % en 2030 par rapport à 2005.

⁸ http://ec.europa.eu/clima/policies/effort/index_en.htm

⁹ Source : CITEPA, lettre d'information C'est dans l'air de septembre 2016

Pour la fraction ESD, elle est de 10 % en 2020 par rapport à 2005, et de 30 % en 2030 par rapport à 2005.

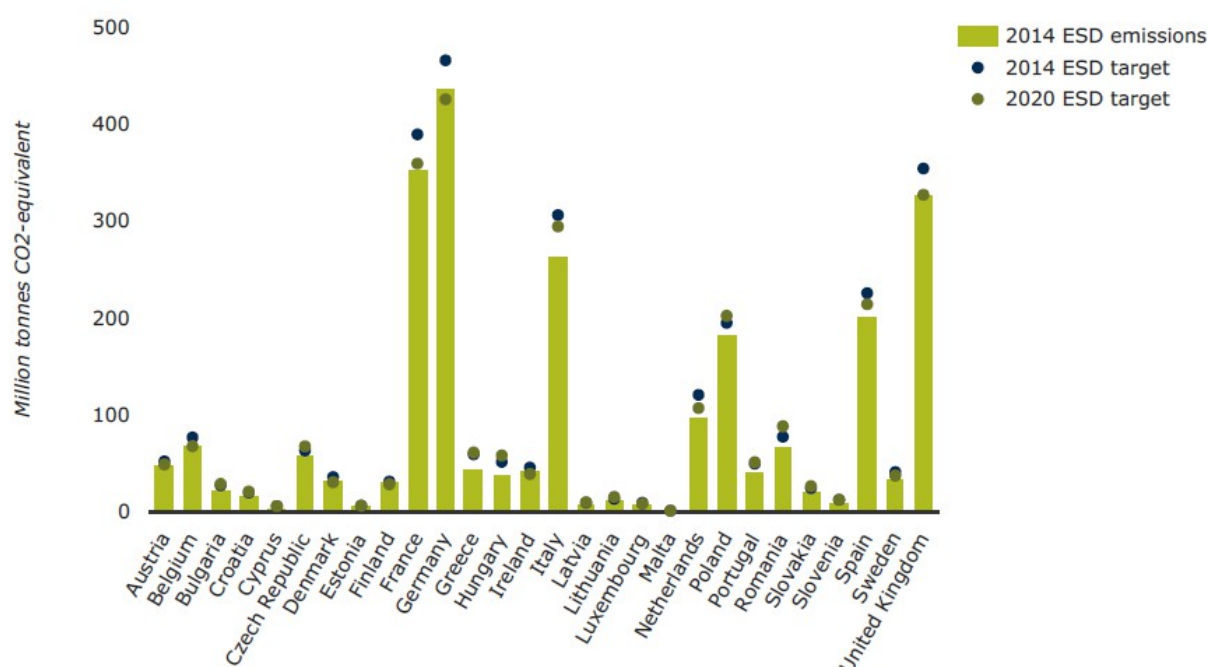
1.2.2. L'objectif de 2020 (-20 % par rapport à 1990) sera dépassé

En 2014, les émissions de l'Union européenne sont 23 % en dessous de celles de 1990.

Si l'on considère la seule fraction ETS, les émissions en 2014 ont baissé de 24 % depuis 2005 (pour un objectif de 21% en 2020), et les projections tablent sur une réduction supplémentaire de 8 % entre 2015 et 2020.

Pour la fraction ESD les émissions ont baissé en 2014 de 12,7 % par rapport à 2005 (pour un objectif de 10 % en 2020) ; la plupart des pays sont en ligne avec ou dépassent leur objectif même si à l'horizon 2020 des inquiétudes subsistent pour l'Autriche, la Belgique, l'Irlande et le Luxembourg.

Chart — Distance from non-ETS emissions to ESD targets



Note: ETS: Emissions trading scheme. ESD: Effort sharing decision.

Non-ETS emissions for 2014 and 2020 ESD targets are provided in Mt CO₂-eq., using Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR4 Global Warming Potential values.

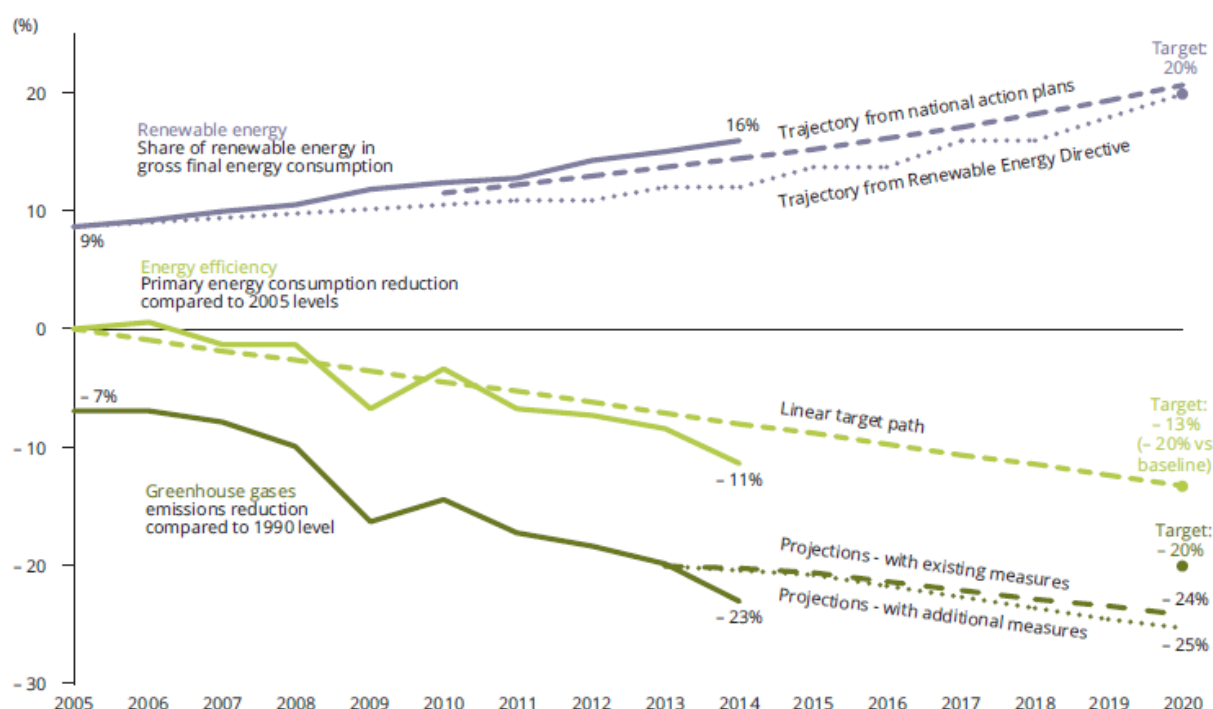
The geographical scope of the United Kingdom is consistent with the coverage of the country under the Kyoto Protocol.

Émissions et cibles ESD par pays – source, agence européenne de l'environnement, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emission-trends-6/assessment>

Selon le rapport d'octobre 2015 sur les tendances et projections sur les objectifs climat et énergie de l'UE¹⁰, en 2020 les émissions de gaz à effet de serre seront

¹⁰ <http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2015>

probablement à un niveau inférieur de 24 % (avec mesures existantes) ou 25 % (avec mesures additionnelles) par rapport à 1990, pour un objectif de 20 %. Ce succès ne concerne pas que les émissions. L'année 2020 devrait aussi voir l'atteinte et le dépassement des objectifs en matière d'efficacité énergétique et de déploiement des énergies renouvelables.



Note : The energy efficiency target for 2020 is defined as an absolute target, set 20% below the level in primary energy consumption projected for 2020 in the 2007 Energy Baseline Scenario of the European Commission. In this figure, this target is expressed as a relative change compared to 2005 levels of EU primary energy consumption, in order to show the required reduction in primary energy consumption over time. The year 2005 was chosen because it is used as a base year for GHG (in the EU ETS and under the ESD) and for renewable energy targets. It also corresponds to a peak in energy consumption in the EU.

Source : EEA, 2015a, 2015b, 2015c, 2015e and EEA, 2015f; Eurostat, 2015a and 2015b.

Tendances relative aux objectifs européens en matière de climat et d'énergie – Source, « Trends and projections in Europe », agence européenne de l'environnement, 2015, http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2015/at_download/file

Les objectifs 2020 semblent donc sous contrôle.

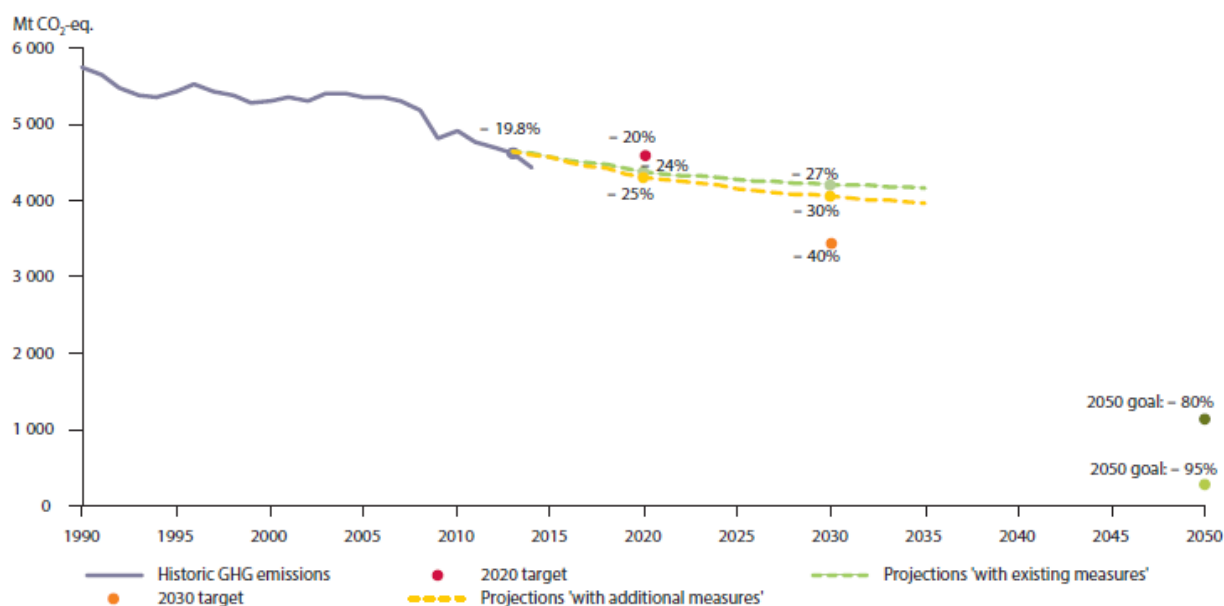
1.2.3. Des projections de réduction en 2030 de 27 % à 30 %, en deçà de l'objectif de 40 % par rapport à 1990

Par contre les objectifs de 2030 semblent encore hors d'atteinte selon le même rapport d'octobre 2015 sur les tendances et projections sur les objectifs climat et énergie de l'UE¹¹, même en tenant compte du fait que toutes les mesures actuellement discutées au sein de l'UE n'ont pas été intégrées dans les projections.

Selon les projections, les réductions se poursuivront au-delà de 2020 mais à un rythme inférieur, ce qui amènera les émissions de 2030 à un niveau inférieur de 27 % à 30 % à ceux de 1990, selon que l'on tienne compte des mesures existantes seulement ou

¹¹ <http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2015>

que l'on tienne compte aussi des mesures « additionnelles » (prévues mais non encore adoptées).



Note: The scope of the GHG emission targets presented in this figure includes emissions from international aviation, and excludes emissions and removals from the LULUCF sector (carbon sinks) and nitrogen trifluoride (NF₃) emissions. The WEM scenario takes currently adopted policies into account. The WAM scenario takes into account the additional effects of planned measures reported by 18 Member States (no WAM scenario was available from Belgium, Bulgaria, Denmark, France, Germany, Greece, Luxembourg, Poland, Slovenia and Sweden) (see Section A2.3 in Annex 2). However, the projections do not take into account recent policy proposals such as the reform of the EU ETS and other measures in non-ETS sectors post 2020.

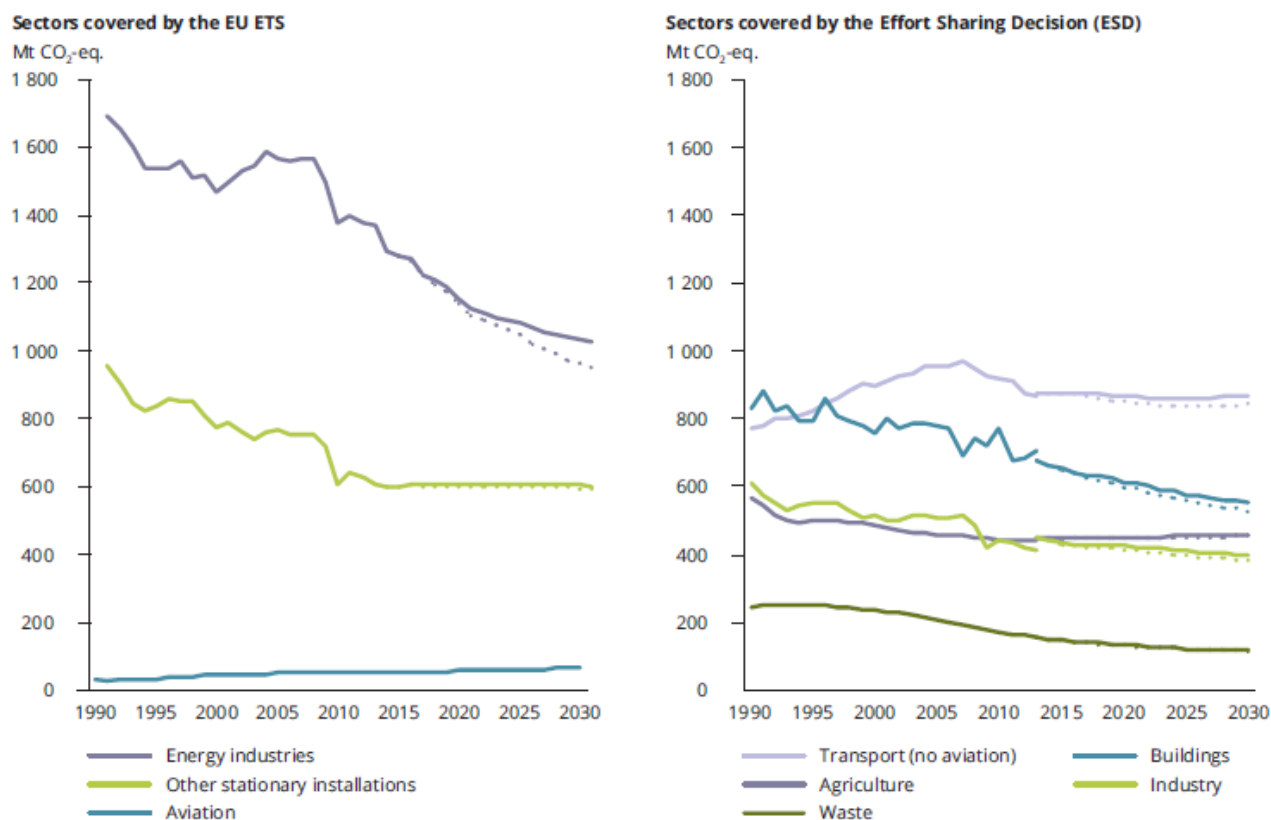
Source: EEA, 2015a, 2015c and 2015d.

Projection des émissions européennes de GES – Source, « Trends and projections in Europe », agence européenne de l'environnement, 2015, http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2015/at_download/file

L'essentiel des réductions d'émissions dans les prévisions à l'horizon 2030 concernent le secteur ETS. Les estimations pour le secteur ETS sont une réduction de 6 % entre 2020 et 2030. Compte tenu de la situation actuelle des émissions du secteur ETS (-24 % en 2014 par rapport à 2005) et des projections (-8,2 % de 2015 à 2020, -6 % de 2020 à 2030) cela représente une prévision de réduction de 34,5 % en 2030 par rapport en 2005, en deçà de l'objectif de 43 %.

Hors ETS, la situation est encore pire, les seules réductions significatives prévues sont dans le secteur du bâtiment. Les émissions industrielles devraient décroître lentement, celles des transports rester quasiment stables et celles de l'agriculture augmenter légèrement. Selon la commission¹², les émissions du secteur ESD (hors ETS) ne devraient baisser que de 24 % en 2030 par rapport à 2005, au lieu de 30 %.

¹² Source : COM(2016)482 p.2, <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2016/FR/1-2016-482-FR-F1-1.PDF>



Note: Solid lines represent historic GHG emissions up to 2013. Dashed lines represent WEM projections. Dotted lines represent projections under the WAM scenario.

The sectors presented here are consistent with the categories defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for the reporting of national GHG inventories. For this figure, emissions are further split between those covered by the EU ETS and those covered by the ESD, based on the application of a fixed percentage for each source category, as described below:

- Energy industries (IPCC sectors 1.A.1, 1.B and 1.C): 91% ETS/9% ESD;
- Manufacturing and construction sector (IPCC sector 1.A.2): 74% ETS/26% ESD;
- Residential and commercial sector (IPCC sectors 1.A.4 & 1.A.5): 1% ETS/99% ESD;
- Industrial processes sector (IPCC sector 2): 60% ETS/40% ESD;
- Transport (without aviation), agriculture and waste (IPCC sectors 1.A.3.a, 3 and 5): 100% ESD;
- Aviation (IPCC sector 1.A.3.a and memo item international bunkers): 34% ETS.

Data were gap-filled for Greece. For Greece and (partly) Poland, the separation of ETS emissions into source categories was carried out by applying average sectoral percentages to total ETS emissions.

Source: EEA, 2015a, 2015b, 2015c and 2015e.

Projection des émissions européennes de GES – Source, « Trends and projections in EUrope », agence européenne de l'environnement, 2015, http://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2015/at_download/file

L'atteinte de l'objectif de réduction de 40 % en 2030 par rapport à 1990 requiert donc, en l'état actuel des projections, des politiques et mesures additionnelles. Parmi les mesures envisagées l'on peut compter une réforme du système UE ETS, une décision ESD (partage des efforts entre États hors secteur ETS) couvrant la période au-delà de 2020 (cf. *infra*), des mesures en faveur de l'efficacité énergétique, ainsi que des mesures spécifiques en direction des transports ou de l'utilisation des sols. L'UTCf (utilisation des terres, leur changement et la forêt), actuellement prise en compte au titre du protocole de Kyoto mais pas dans les objectifs de réduction à l'horizon 2020, est aussi un sujet, car le puits de carbone net de l'UE au titre de l'UTCf (représentant une absorption annuelle représentant 6 % des émissions de GES de l'UE, soit encore

et par exemple 303 MtCO₂eq en 2012) est selon les projections susceptibles de décroître de 7 % entre 2010 et 2020, et de poursuivre sa décroissance au-delà et jusqu'en 2050. Cela affecterait donc les émissions nettes de l'UE dans un sens défavorable.

Ces projections sont peu ou prou confirmées par un récent rapport de l'IDDRI en date de novembre 2016, intitulé «Union de l'énergie bas carbone: une évaluation des avancées de l'UE vers ses objectifs climatiques à l'horizon 2030 et 2050 »¹³. Certes, des progrès significatifs sont survenus en matière de décarbonation structurelle du système énergétique : intensité carbone de la production d'électricité réduite de 20,9 % entre 2000 et 2014 soit -1,7 %/an ; consommation par m² des logements réduite de 21,2 % entre 2000 et 2013 ; réduction de la consommation de carburant par passager.km de 8,7 % entre 2000 et 2013.

Mais pour beaucoup d'indicateurs le rythme de réduction est trop lent. L'intensité énergétique du transport de passagers, par exemple, a baissé au rythme de 0,7 %/an alors qu'il faudrait plus de 2 % pour atteindre le facteur 4 en 2050. De plus une partie de la décarbonation observée est liée aux conséquences de la crise de 2008. Enfin la décarbonation des processus et matériaux industriels, qui prendra du temps, n'est pas préparée de manière adéquate. De manière générale, il faut bien se donner des objectifs pour 2050, et non seulement procéder à des ajustements marginaux pour atteindre les objectifs de 2030. Les mesures préconisées par le rapport sont une attention accrue aux leviers de réduction d'émissions sectoriels, un renforcement des propositions de mise en œuvre du paquet énergie climat 2030 (notamment en matière d'efficacité énergétique), un renforcement du système EU ETS afin d'éviter la persistance de prix du carbone bas et ineffectifs, la mise en place de politiques très ambitieuses pour la décarbonation des transports et le développement des véhicules alternatifs, le renforcement des mesures pour la rénovation et le changement d'alimentation énergétique des bâtiments, un remaniement des politiques européennes pour la décarbonation des industries énergétiquement intensives et exposées à la compétition (avec par exemple de la visibilité pour les mesures de promotion technologique, de financement des démonstrateurs, etc.), et la mise en place de politiques pour l'attrition de la production d'électricité à partir de charbon.

1.2.4. Le programme NER 300

Le programme NER 300 (New entrant Reserve 300¹⁴) est un programme visant spécifiquement à financer des démonstrateurs de technologies aptes à réduire les émissions de gaz à effet de serre au sein de l'UE, notamment la capture et le stockage du carbone (CSC), et les énergies renouvelables (EnR) innovantes. Un premier appel à propositions doté de 1,1 Md€ a été lancé fin 2010 avec attribution de fonds à 20 projets d'EnR le 18 décembre 2012. Un second appel à propositions doté de 1 Md€ a été annoncé en avril 2013 et a désigné les lauréats le 8 juillet 2014, avec 18 projets d'EnR et un projet de CSC. De fait, le nombre de projets spécifiquement « carbone » a été décevant, les dotations étant allées vers des projets énergétiques. Dans le cadre de la réforme de l'ETS il est prévu pour succéder à ce fonds NER300 un nouveau fonds d'innovation pour les EnR, la CSC et l'industrie à basse intensité énergétique,

¹³ <http://www.iddri.org/Publications/State-of-the-Low-Carbon-Energy-Union-Assessing-the-EU-s-progress-towards-its-2030-and-2050-climate-objectives> et http://www.iddri.org/Publications/Collections/Analyses/ST0816_TS%20et%20al_low%20carbon%20energy%20union.pdf

¹⁴ https://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ner300_en . 3 »300 » correspond à la dotation du programme, soit 300 millions de quotas d'émission

doté de 400 millions de quotas à partir de 2021 et 50 millions pour démarrer avant 2021.

1.2.5. La communication de novembre 2015 de la Commission Européenne sur l'état de l'Union de l'énergie

La commission a publié le 25 février 2015 une communication sur l'« union de l'énergie » en vue d'un « système énergétique européen intégré » centré sur « une politique climatique ambitieuse » et articulé autour de cinq axes : sécurité énergétique, intégration du marché européen de l'énergie, efficacité énergétique, décarbonation de l'économie, et enfin R&D et compétitivité. Elle a ensuite émis le 18 novembre 2015 son premier rapport sur l'état de l'union de l'énergie¹⁵, assorti de fiches pays et de recommandations.

Sur le sujet de la décarbonation de l'économie le rapport note le dépassement probable en 2020 de l'objectif en matière d'émissions de GES (-24 % par rapport à 1990, au lieu de -20%), l'atteinte quasi générale des objectifs hors ETS, et l'atteinte probable des objectifs en matière d'énergies renouvelables (20 % de renouvelables dans l'énergie consommée), avec cependant quelques pays (dont la France) qui doivent examiner leurs politiques à cet égard. Il convient aussi d'intégrer les énergies renouvelables dans le marché de l'électricité en particulier, et développer les initiatives régionales.

En matière d'efficacité énergétique, des mesures additionnelles semblent nécessaires, Divers États dont la France doivent sur la période 2014-2020 réduire plus rapidement leur consommation d'énergie (primaire et finale) que sur la période 2005-2013 pour atteindre leurs objectifs indicatifs. Les tendances aussi à infléchir dans le secteur de la production d'énergie, en particulier doivent être encouragés la chaleur produite par cogénération haute performance et le chauffage/refroidissement urbain à haute efficacité.

En matière de marché de l'énergie l'objectif individuel d'interconnexion à hauteur de 10 % de la capacité de production d'électricité est en bonne voie et le déploiement de compteurs intelligents bien amorcé. L'information des consommateurs en matière d'efficacité énergétique, et les conditions d'investissements des clients privés doivent être améliorés. Les marchés de l'électricité et surtout du gaz restent nationaux.

En matière de sécurité énergétique des progrès sont en cours mais encore nécessaires, avec des pistes d'interconnexion et de développement de coopérations régionales.

En matière de recherche, innovation et compétitivité, les acteurs européens industriels, de recherche et académiques sont bien placés. Certains pays (dont la France) ont pris des mesures fiscales favorables à l'environnement et la croissance, mais des progrès restent possibles.

¹⁵ <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0572>

1.2.6. Propositions récentes pour 2030

1.2.6.1. Secteur ETS

« Les secteurs de l'ETS (installations de production d'électricité et industrie manufacturière surtout, mais aussi aviation), qui couvrent 40 à 45% des émissions totales de l'UE ont déjà fait l'objet d'une proposition de directive pour 2021-2030 révisant la directive Quotas (2003/87/CE modifiée par la directive 2009/29/CE), présentée par la Commission le 15 juillet 2015, texte toujours en discussion. »¹⁶

1.2.6.2. Secteur ESD

Le secteur ESD a fait le 16 juillet 2016 l'objet d'une proposition de règlement européen pour en accélérer les réductions d'émissions sur la période 2021-2030. La France se voit par exemple affecter un objectif de réduction de ses émissions de -37 % en 2030 par rapport à 2005 (Bulgarie : -0 %; Suède : -40%). Des mécanismes de flexibilité sont disponibles : compensation d'émissions ESD par des quotas ETS licite pour certains pays (mais pas la France), compensation plafonnée d'émissions ESD par des absorptions nettes UTCF. Le plafond de 59,8 MtCO₂éq sur la période 2021-2030 pour la France est le plafond de loin le plus élevé. Le plafond total est de 280 MtCO₂éq sur 2021-2030 pour l'ensemble de l'UE.

Une étude d'impact de ces propositions a aussi été réalisée¹⁷. En substance une réunion de 40 % des émissions provoquerait une augmentation « de 0,15 % à 0,45 % » du coût des systèmes énergétiques rapportés au PIB.

1.2.7. Une feuille de route pour un facteur 5 en 2050

1.2.7.1. La feuille de route de 2010

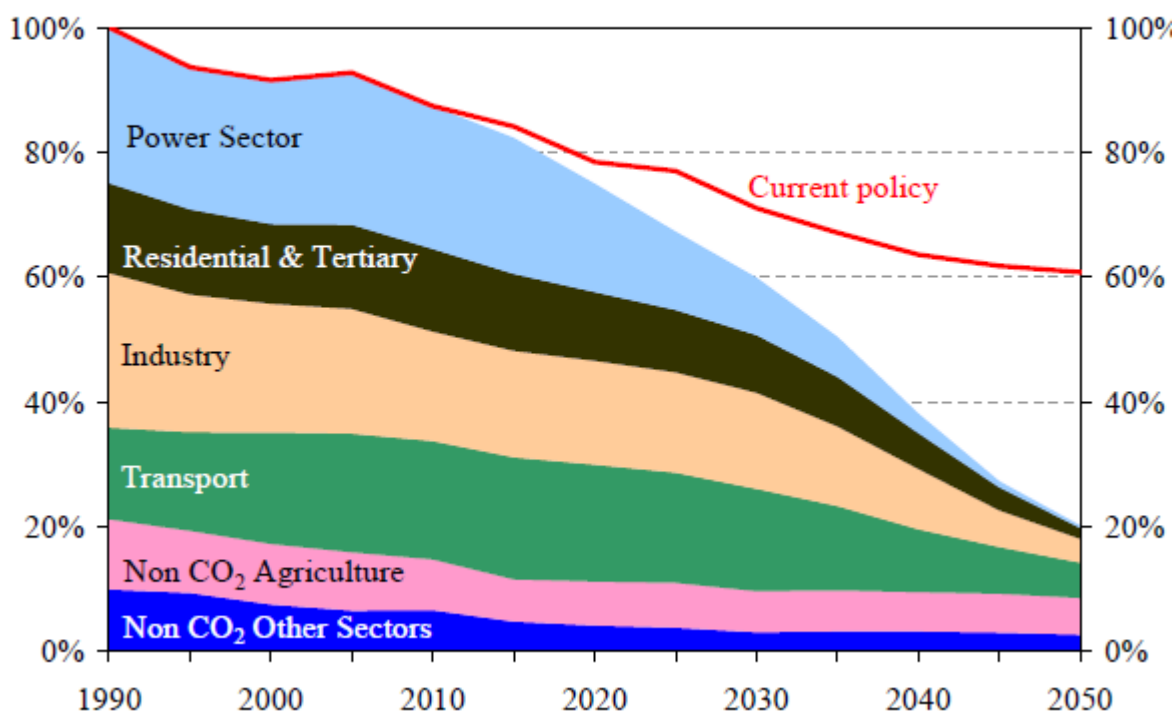
Au-delà, la « feuille de route européenne pour une économie bas carbone compétitive en 2050 » (« *A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050* », décembre 2010¹⁸) vise une réduction des émissions européennes comprise entre 80 % et 95 %, en tout état de cause au minimum de 80 % (entre 79 % et 82%) par rapport à l'année de base 1990, avec un objectif intermédiaire de 60 % en 2040. Les secteurs qui doivent le plus réduire leurs émissions sont la production d'énergie, le bâtiment et l'industrie.

¹⁶ Source : CITEPA, lettre d'information C'est dans l'air de septembre 2016

¹⁷ http://ec.europa.eu/clima/news/docs/20160720_impact_assessment_1_en.pdf

¹⁸ http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/hedegaard/headlines/topics/docs/com_2011_112_en.pdf

Figure 1: EU GHG emissions towards an 80% domestic reduction (100% =1990)



GHG reductions compared to 1990	2005	2030	2050
Total	-7%	-40 to -44%	-79 to -82%
Sectors			
Power (CO ₂)	-7%	-54 to -68%	-93 to -99%
Industry (CO ₂)	-20%	-34 to -40%	-83 to -87%
Transport (incl. CO ₂ aviation, excl. maritime)	+30%	+20 to -9%	-54 to -67%
Residential and services (CO ₂)	-12%	-37 to -53%	-88 to -91%
Agriculture (non-CO ₂)	-20%	-36 to -37%	-42 to -49%
Other non-CO ₂ emissions	-30%	-72 to -73%	-70 to -78%

Trajectoire des émissions de GES européennes, globales et sectorielles – source : « a roadmap for moving to a competitive low-carbon economy in 2050 », 2011

Pour le secteur de la production d'énergie, la feuille de route très ambitieuse vise une ample décarbonation, qui serait même quasiment totale dans la production d'électricité. Outre le recours aux énergies renouvelables, la feuille de route prévoit entre autres 11 GW de production d'énergie avec capture et stockage de carbone (CSC ; CCS en anglais) en 2030 et 100 GW en 2050 pour un coût de respectivement 18-36 Md€ et 160-320 Md€. En 2050, l'électricité est réputée être complètement décarbonée.

Le secteur de l'industrie doit fortement réduire ses émissions ; un facteur deux est jugé atteignable grâce à des processus plus efficaces en termes d'énergie et de ressources, un recyclage accru, et des technologies de réduction d'émissions non CO₂ (protoxyde d'azote N₂O et méthane CH₄). Aller au-delà suppose à partir de 2035 des processus et équipements plus avancés et le recours à des technologies de CSC, pour un coût annuel estimé à plus de 10 G€.

Dans les transports, la réduction des émissions passe jusqu'en 2025 par l'amélioration de l'efficacité des véhicules, puis par l'électrification et/ou le développement de biocarburants après 2030.

Le secteur du bâtiment est susceptible de réduire ses émissions de 90 % par l'amélioration de son efficacité énergétique, avec des bâtiments neufs zéro-énergie à partir de 2021.

En agriculture, la feuille de route requiert des diminutions d'émissions comprises entre - 42 et - 49 %, *via* l'utilisation efficace des engrais, la méthanisation, une meilleure gestion des fumiers, de meilleurs fourrages, la diversification et la commercialisation de la production au niveau local, une plus grande productivité du bétail, ainsi que la maximisation des bénéfices de l'agriculture extensive.

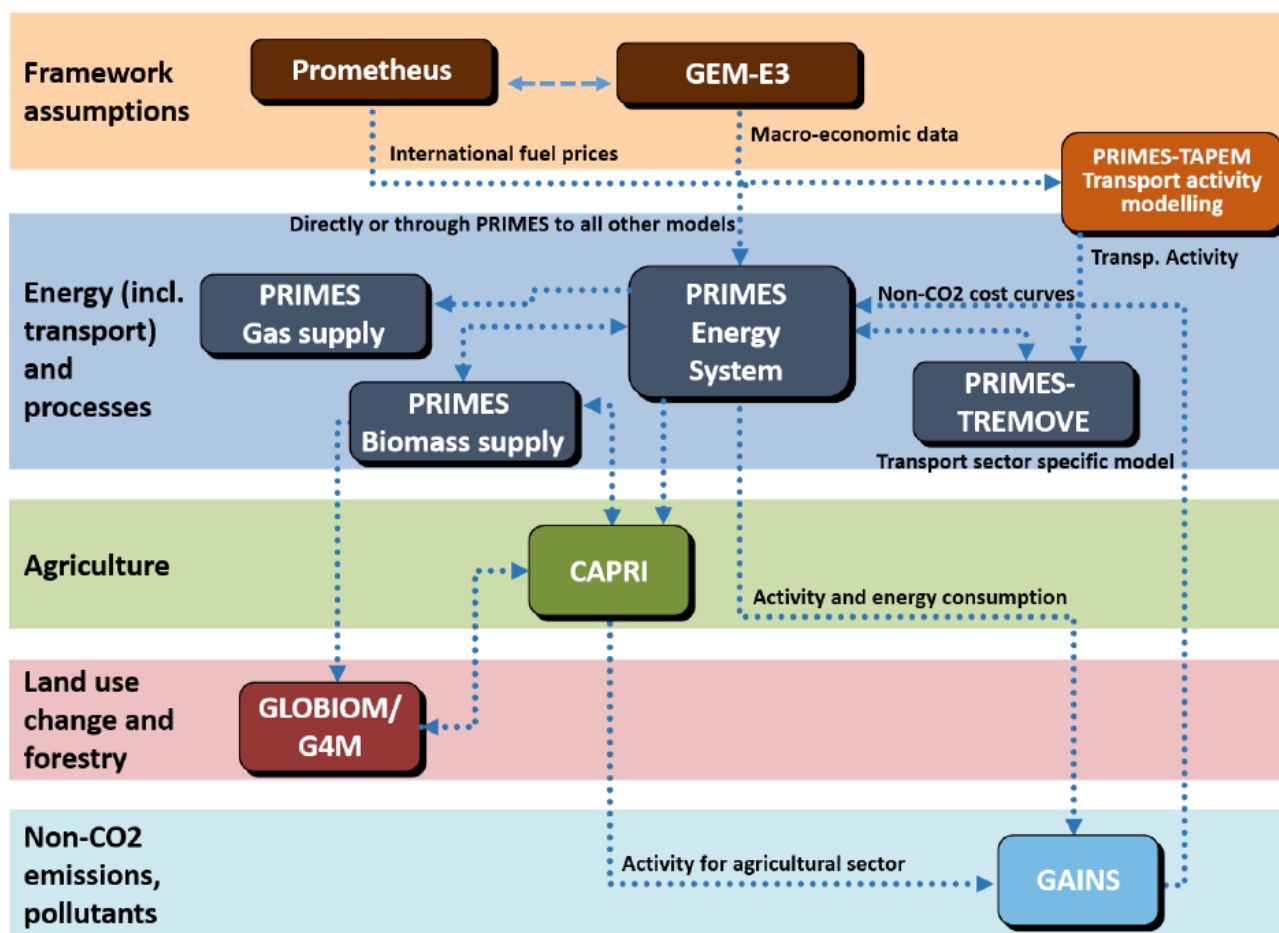
1.2.7.2. Les scénarios de référence de 2016

Le 20 juillet 2016 la Commission européenne a publié ses dernières projections dans un document « EU Reference Scenario 2016 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050 »¹⁹. Les projections sont basées sur une série d'hypothèses démographiques, macroéconomiques, technologiques et politiques. En particulier elles prennent en compte la mise en œuvre complète des objectifs légalement contraignants pour 2020 et de la législation européenne. Par contre elles n'incluent pas les objectifs 2030, objets d'un accord politique mais non encore adoptés légalement.

Il ne s'agit donc pas de prédictions, de toute façon malaisées au vu des incertitudes relatives à la croissance économique, aux prix des combustibles fossiles, aux coûts technologiques et à la qualité de la mise en œuvre des politiques européennes au sein de l'UE.

Le dispositif de modélisation est le suivant :

¹⁹ Voir <https://ec.europa.eu/energy/en/news/reference-scenario-energy>,
<http://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-modelling>,
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf,
[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RE
SULTS%20%282%29-web.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RESULTS%20%282%29-web.pdf)

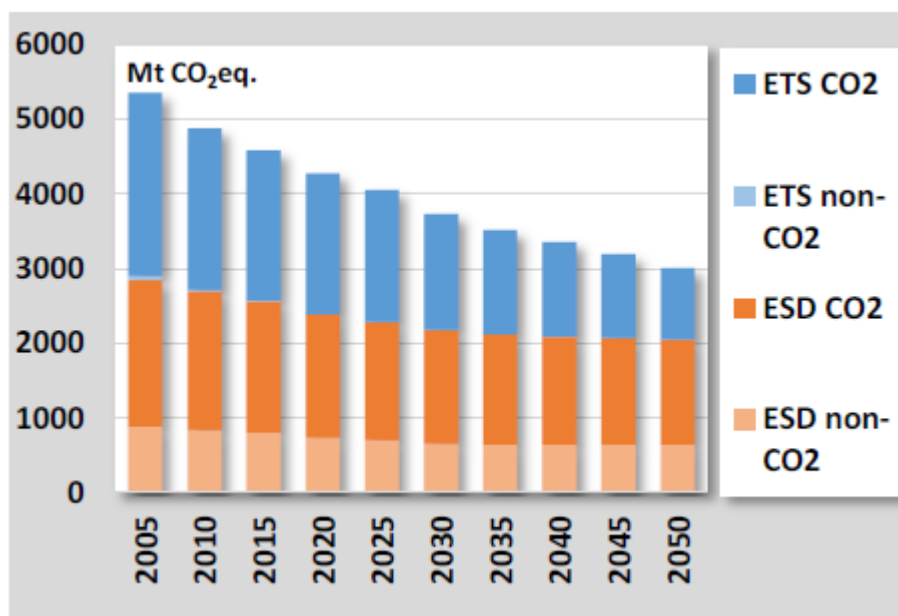


Ensemble des outils de modélisation utilisée pour le rapport « EU reference scenario 2016 » - source,

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

Le rapport examine l'aspect énergétique en détail. Il projette une décroissance de la production et des importations de combustibles fossiles, avec seulement une lente décroissance de la dépendance de l'UE aux importations. Les sources d'énergies renouvelables croissent vigoureusement (25 % de la consommation brute en 2050 contre 7 % en 2005 et 19 % en 2030), l'efficacité énergétique s'améliore de manière significative, les productions d'électricité d'origine nucléaire et gazière restent stables (notamment en raison de forts investissements cycliques dans les années 2020-2020 et surtout à partir de 2035). Le découplage entre PIB et demande d'énergie primaire se poursuit. On observe une augmentation des volumes d'électricité échangés, avec des flux entre régions passant d'une part de 17 % en 2015 à 29 % en 2030 avec stabilisation ensuite.

En ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre (GES), les projections sont une réduction par rapport à 1990 de 25,7 % en 2020 (22 % pour le CO₂, 39 % pour les autres GES, surtout dans les secteurs des déchets et de l'industrie), 35 % en 2030 et 48 % en 2050, bien en deçà des objectifs ou étapes affichés de -40 % en 2030, -60 % en 2040 et plus de -80 % en 2050.

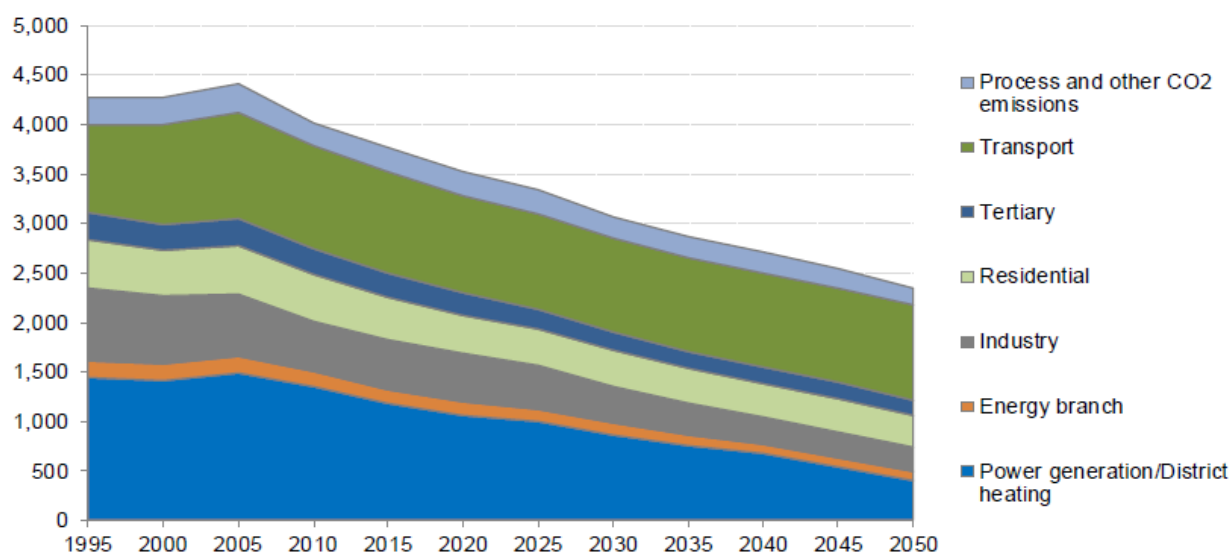


Évolution et projection des émissions totales de GES dans l'UE (hors UTCF) entre 2005 et 2050 – Source, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

L'essentiel des réductions d'émissions projetées sont le fait du secteur ETS.

En particulier les réductions d'émissions de CO₂ sont plus importantes dans le secteur ETS que dans le secteur ESD.

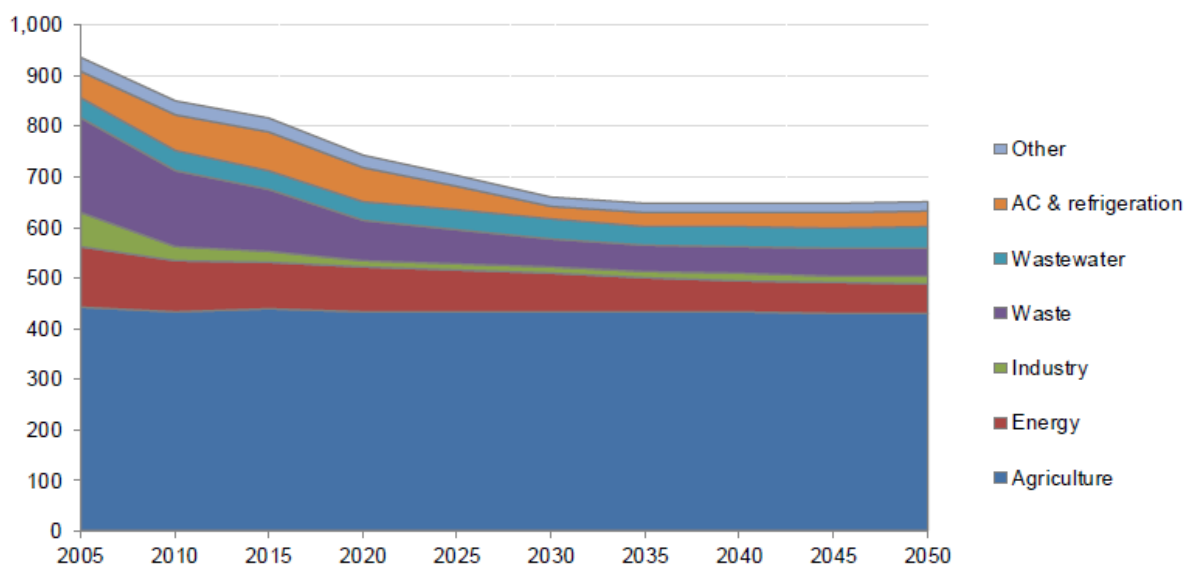
Du point de vue des secteurs d'activité traditionnels, on observe notamment une décroissance bien plus lente dans le secteur des transports que dans les autres secteurs).



Source: PRIMES

Évolution des émissions de CO₂ (en MtCO₂éq) par secteur dans l'UE, projetées jusqu'à 2050 – source, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RESULTS%20%282%29-web.pdf

Les émissions de GES jusqu'en 2030, autres que le CO₂, décroissent un peu moins vite si on prend comme année d'origine 2005 (-29 % hors CO₂ contre -31% pour le CO₂).

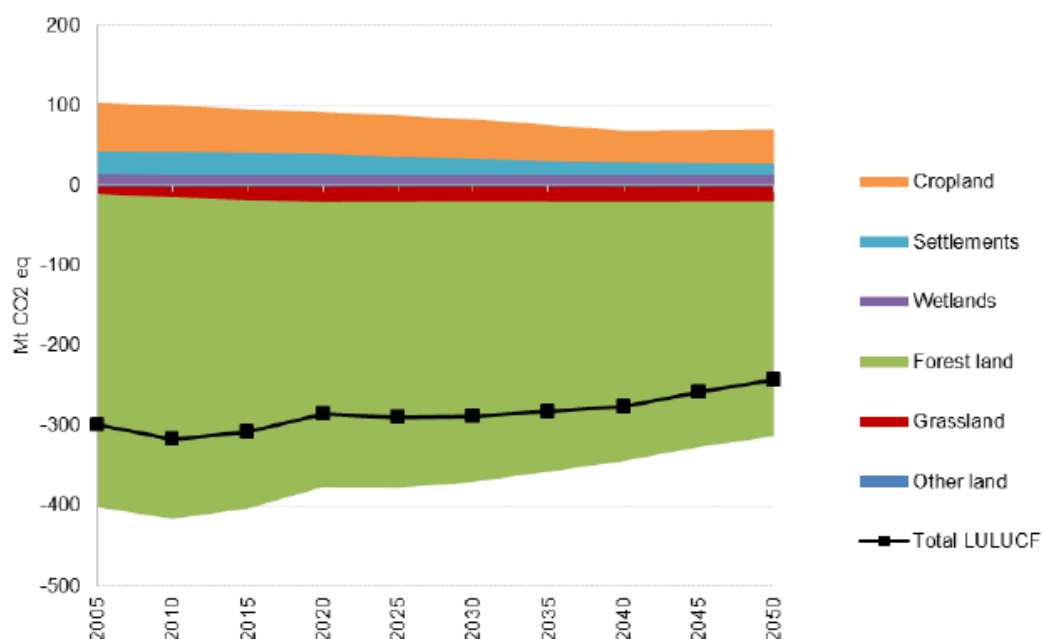


Source: GAINS

Évolution des émissions hors CO₂ (en MtCO₂éq) par secteur dans l'UE, projetées jusqu'à 2050 – source, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RESULTS%20%282%29-web.pdf

Par contre si on prend comme référence l'année 1990 elles décroissent plus que celles de CO₂ et atteignent -46 % par rapport à 1990 contre -32 % pour le CO₂.

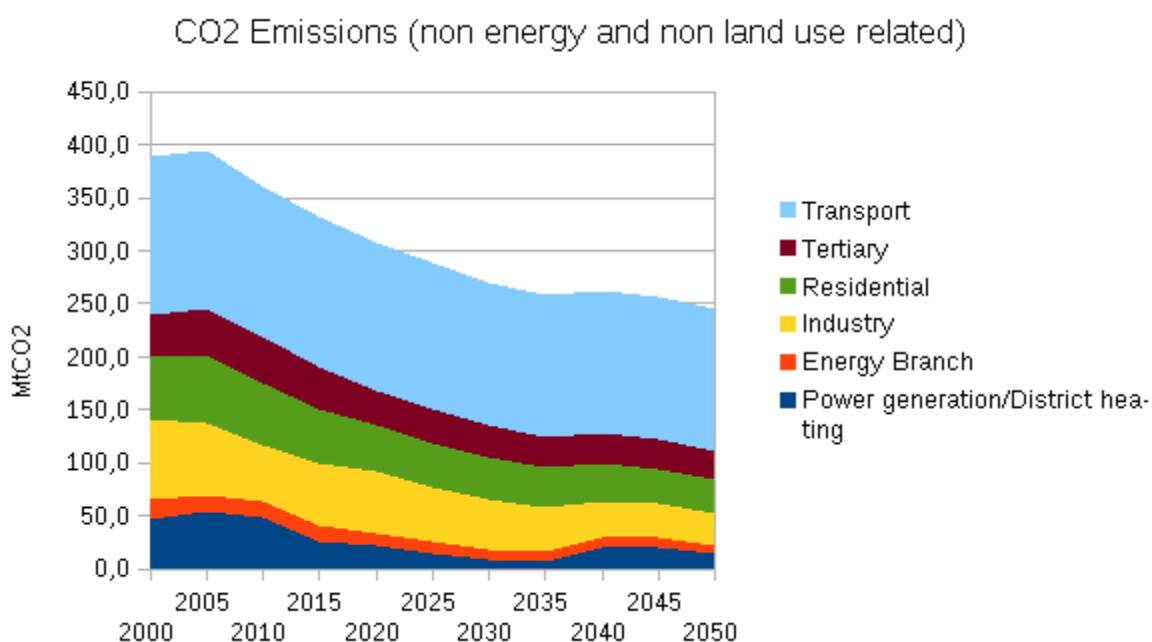
En ce qui concerne le secteur UTCTF, le puits net décroît de -299 MtCO₂éq en 2005 à -288 MtCO₂éq en 2030, essentiellement à cause de la décroissance du puits forestier et malgré la compensation apportée par l'afforestation.



Source: GLOBIOM-G4M

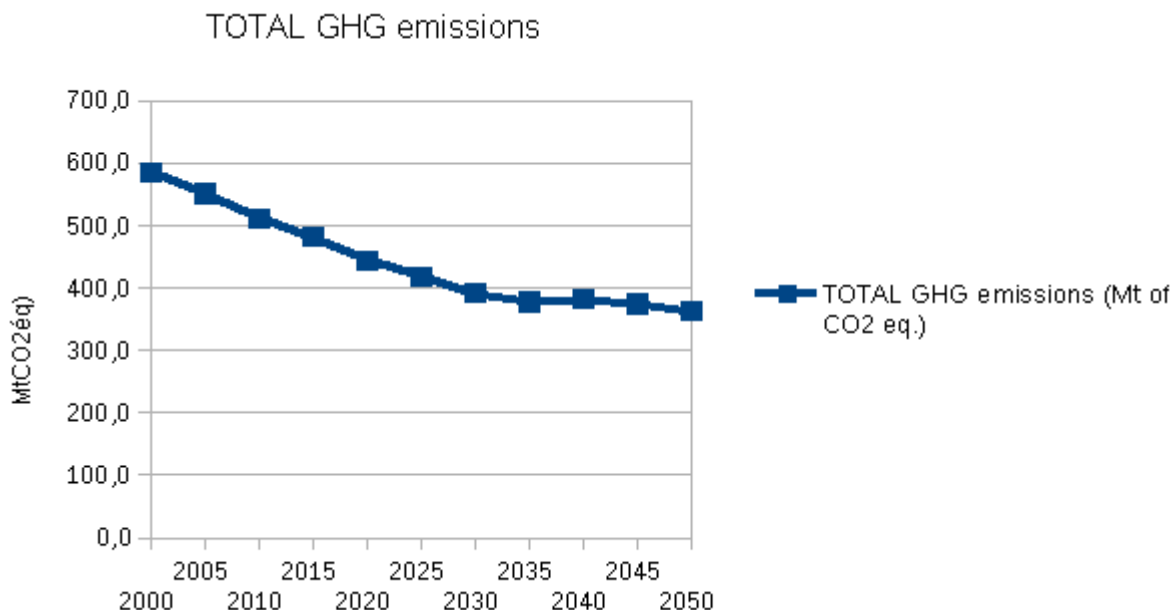
Évolution des émissions et puits (en MtCO₂éq) du secteur UTCF (ou UTCATF, en anglais LULUCF) dans l'UE à 28, – source, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_sce_nario_MAIN_RESULTS%20%282%29-web.pdf

Le rapport fournit aussi des projections pays par pays. Par exemple, pour les émissions de CO₂ en France :



Émissions de CO₂ par secteur en France – Source: mission, sur la base de données issues de <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/AppendixRefSce.xls>

Et pour les émissions globales de GES en France les projections sont les suivantes :



Émissions totales de GES en France – Source, mission sur la base de données issues de
<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/AppendixRefSce.xls>

Ces projections sont clairement en deçà des ambitions affichées, en l'absence de politiques et mesures supplémentaires.

1.3. Conclusion

L'Union européenne est en avance sur ses objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre en 2020, mais en retrait sur ses objectifs de 2030 et encore plus au-delà.

En novembre 2016, la Commission a présenté un paquet législatif « une énergie propre pour tous les Européens »²⁰ qui, dans le cadre de la réduction des émissions de 40 % des émissions de GES en 2030, vise « trois principaux objectifs: donner la priorité à l'efficacité énergétique, parvenir au premier rang mondial dans le domaine des énergies renouvelables et offrir des conditions équitables aux consommateurs ». Sont notamment concernées les directives sur les énergies renouvelables 2009/28/CE, la directive électricité 2009/72/CE, le règlement électricité 714/2009, le règlement sur la sécurité d'approvisionnement en électricité abrogeant la directive 2005/89/CE, la directive sur la performance énergétique des bâtiments 2010/31/UE, la directive efficacité énergétique 2012/27/UE, le règlement sur l'agence de coopération des régulateurs d'énergie 713/2009, le règlement sur la gouvernance de l'Union de l'énergie, le règlement écoconception pour la mise en œuvre de la directive 2005/125/CE. Un certain nombre de points sont sujets à débat, par exemple : biocarburants de première génération ou biocarburants avancés peut-être moins matures ; soutien ciblé aux filières d'énergies renouvelables ou appels d'offre technologiquement neutres ; efficacité énergétique et son impact potentiellement négatif sur les prix du carbone ; soutiens à la rénovation sur la base d'économies

²⁰ <https://ec.europa.eu/energy/en/news/commission-proposes-new-rules-consumer-centred-clean-energy-transition>

réelles à partir d'un certain volume en raison des coûts de diagnostic ; remise en cause de la régulation des tarifs de l'électricité, etc. On peut s'attendre sur ce paquet très ample à une négociation de deux ans entre Commission, Parlement et Conseil européens.

Même en admettant l'atteinte des objectifs de 2030 par l'introduction de nouvelles politiques et mesures, l'atteinte du facteur 5 espéré pour 2050 reste difficile à atteindre, et suppose une attention accrue envers les objectifs sectoriels, une transformation significative du système énergétique européen (décarbonation complète de la production d'électricité et notamment élimination du charbon), une large électrification des secteurs carbonés comme les transports, une forte décarbonation de l'industrie par des mesures d'efficacité, de recyclage et de CSC, un développement rapide des bâtiments zéro énergie et une amélioration de l'efficacité énergétique du parc, des mesures d'optimisation en agriculture. Les politiques à mettre en œuvre doivent avoir 2050 en ligne de mire afin d'entamer les réformes nécessaires, qui prendront du temps, au lieu de se satisfaire d'efforts modérés pour atteindre un objectif intermédiaire à l'horizon 2030.

2. Royaume-Uni

Les analyses présentées ici sont essentiellement issues du rapport annuel d'avancement²¹ (juin 2016) présenté au parlement britannique par le « *Committee on climate change* », comme prévu par la loi de 2008 sur le changement climatique.

Le taux de change de la livre Sterling (£) était approximativement de 1,3€ pour 1£ jusqu'au vote de sortie de l'Union européenne (« brexit ») du 23 juin 2016 qui a provoqué une baisse. Sa valeur en août 2016 était de 1,15€.

2.1. Des évolutions récentes essentiellement dues au secteur de l'énergie

Selon un rapport au Parlement les émissions britanniques en 2015 (y compris la contribution relativement limitée de l'usage des terres, leurs changements et la forêt - UTCF²²) étaient de 497 MtCO₂éq, en retrait de 3 % par rapport à l'année précédente et de 38 % inférieures à celles de 1990 hors aviation²³. Si l'on inclut l'aviation internationale, la baisse a été de 35 % entre 1990 et 2014²⁴. Les données d'Eurostat, qui n'incluent par l'UTCF, sont un peu moins favorables et indiquent en 2014 une baisse de 32,5 % par rapport à 1990 (31,5 % si l'on inclut l'aviation internationale).²⁵

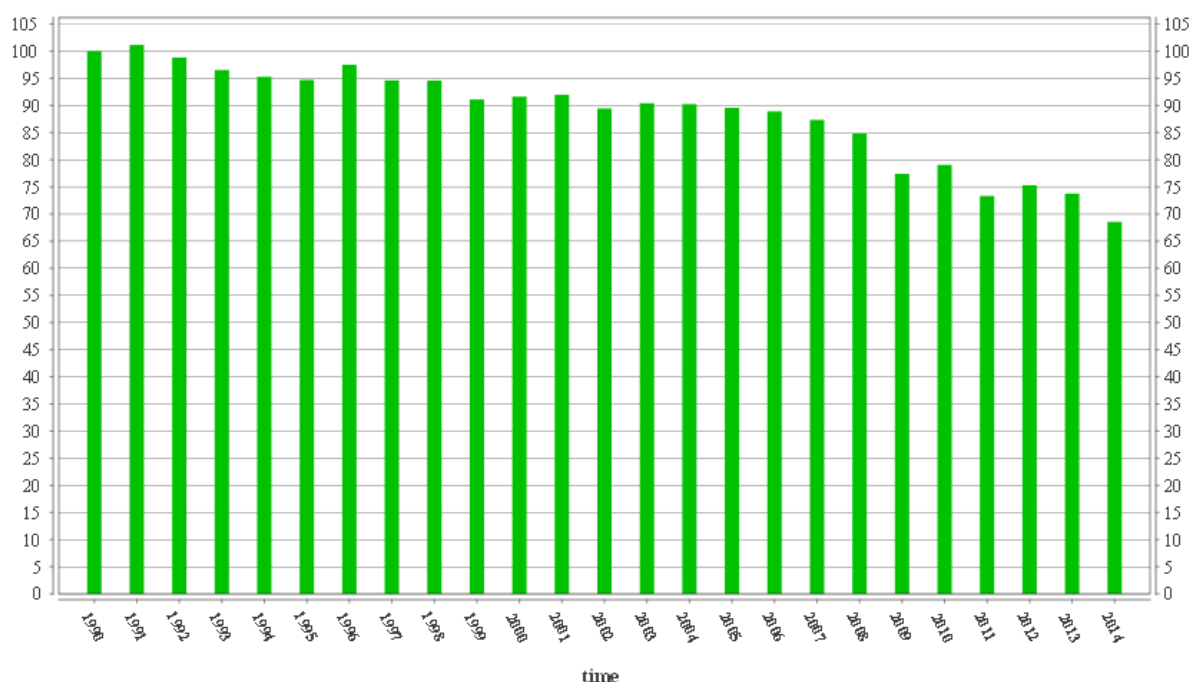
²¹ « Meeting carbon budgets – 2016 progress report to parliament », juin 2016, <https://www.theccc.org.uk/publication/meeting-carbon-budgets-2016-progress-report-to-parliament/>

²² Selon le même rapport, la prise en compte de l'UTCF revient à réduire les émissions britanniques de gaz à effet de serre d'environ 9 MtCO₂, soit 2 % des émissions

²³ Cf <https://www.theccc.org.uk/publication/meeting-carbon-budgets-2016-progress-report-to-parliament/> et <https://documents.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2016/06/2016-CCC-Progress-Report.pdf> . Par comparaison, les émissions françaises, périmètre SECTEN ou périmètre Kyoto, étaient en 2015 inférieures de 15-16 % à celles de 1990.

²⁴ <https://documents.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2016/06/2016-CCC-Progress-Report.pdf> ou

²⁵ <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdcc100&language=en> . Ainsi, l'on peut de justesse réconcilier les données du rapport au parlement britannique avec les données d'Eurostat : -38 % en 2015 , avec un gain de 3 % par rapport à 2014 correspond à -35 % en 2014 ; l'UTCF correspondant à 2 % des émissions, cela correspond approximativement à -33 % en 2014 par rapport à 1990, à comparer aux -32,5 % des données Eurostat



Évolution récentes des émissions au Royaume-Uni en base 100 à partir de 1990 – Source : <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=1&pcode=tsdcc100&language=en&toolbox=close>

Rapportées à la population (65 M habitants), cela représente 7,6 MtCO₂éq par habitant, nettement en retrait du chiffre de 2008 (10,7 MtCO₂éq) cité dans le rapport CGEDD de 2013, chiffre élevé « dû à la production et à la consommation d'énergie, historiquement liée au charbon, depuis 20 ans davantage tournée vers le gaz et les EnR ». Les données d'Eurostat, qui elles ne prennent pas en compte l'UTCF, font état en 2014 d'émissions de 8,65 tCO₂éq/habitant en 2014 contre 11,18 en 2008 et 12,66 en 2000.²⁶

L'essentiel de ce progrès est d'ailleurs bien dû au secteur de la production d'énergie (25 % des émissions de CO₂ britanniques et 21 % des émissions de GES – 12 % pour la France). Ce secteur a dans la même période divisé par deux ses émissions, notamment par la fermeture des centrales à charbon (tendance de long terme encouragée par un prix du carbone croissant, relevé en avril 2015 de 9,5£/tCO₂ à 18,£/tCO₂) l'usage du gaz naturel, et développement des EnR et du nucléaire (qui en 2015 couvrent presque la moitié de la demande), mais aussi par contraction de la demande depuis 2009. Le taux de décroissance annuel des émissions du secteur de l'énergie a été de 5 % entre 2009 et 2014.

Mis à part les progrès récents dans le secteur de la production de l'énergie, les progrès dans les autres secteurs ont été plus réduits (industrie, bâtiment, déchets) voire nuls (agriculture et UTCF, gaz fluorés) ou négatifs (transports).

²⁶ <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdcc100&language=en>

Les émissions directes²⁷ du bâtiment (15 % des émissions britanniques de CO₂, 18 % des émissions de GES britanniques – 20% pour la France) ont baissé de 12 % entre 2007 et 2015 mais restent stables depuis 2012 en raison notamment d'une absence de progrès dans le tertiaire²⁸ et d'une stagnation depuis 2012 des mesures d'isolation dans le résidentiel et de recours à la chaleur décarbonée.

L'industrie (23 % des émissions de GES britanniques – 18 % pour la France) a divisé par deux ses émissions depuis 1990, et en moyenne de 2 %/an sur la période 2009-2014.

Les transports (24 % des émissions de GES britanniques – 28 % pour la France), après une lente baisse entre 2007 et 2012, voient leurs émissions augmenter dans les années récentes. Les gains en efficacité énergétique ont été plus que compensés par la demande croissante de déplacements, elle-même alimentée par la croissance économique et les baisses des prix des carburants.

L'agriculture (9,5 % des émissions de GES britanniques, moins 2 % si l'on tient compte de l'UTCF – 19 % pour la France) a depuis 1990 réduit ses émissions de 16 %, mais ses émissions ne décroissent plus depuis 2008.

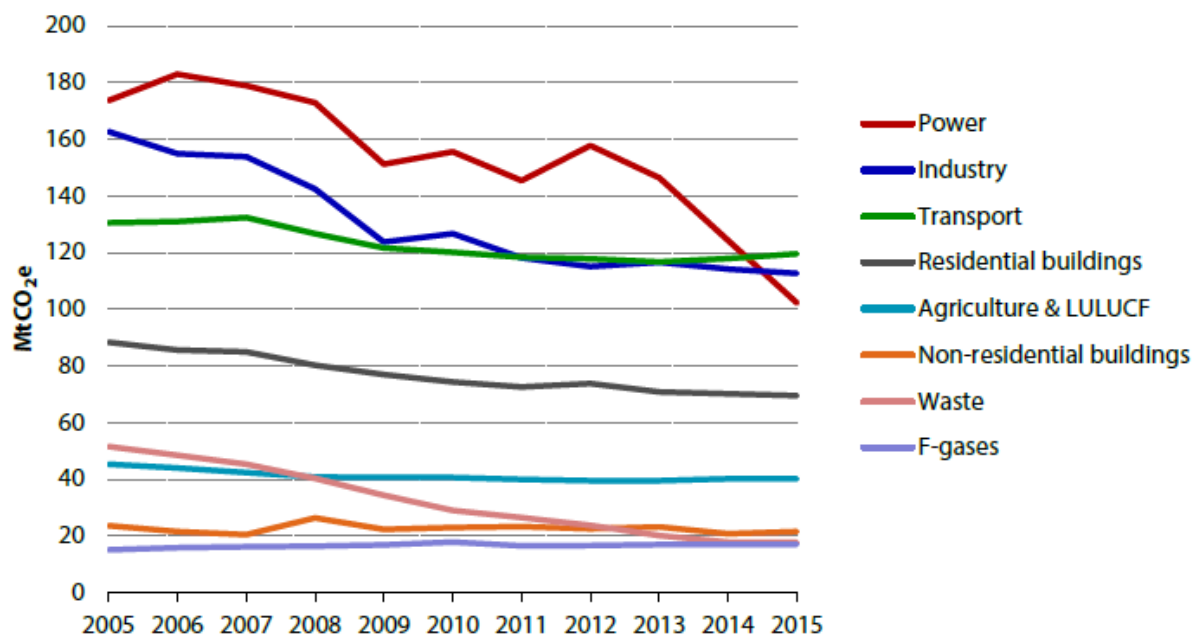
Par habitant sur la base des chiffres 2015, chaque Britannique émet :

- 1,6 t CO₂éq pour l'énergie (moyenne européenne 2013 = 2,6 t)
- 1,8 t pour les transports (moyenne européenne 2013 = 1,7 t) ;
- 1,8 t pour l'industrie (moyenne européenne 2013 = 1,7 t) ;
- 1,4 t pour le résidentiel / tertiaire (moyenne européenne 2013 = 1,0 t) ;
- 0,7 t pour l'agriculture (moyenne européenne 2013 = 1,0 t).

²⁷ La consommation d'électricité dans le bâtiment (émissions indirectes) correspond à une part de 15 % supplémentaire des émissions britanniques. En France, les émissions de GES du bâtiment représentent 20 % des émissions nationales, et 25 % en ajoutant les émissions indirectes associées à la production d'électricité et de chaleur pour les bâtiments.

²⁸ Qui représente 15 % des émissions du bâtiment, contre 75 % pour les logements et 10 % pour le secteur public.

Figure 1. Progress reducing emissions since 2012 has been almost entirely due to the power sector



Source: DECC (2016) *Provisional GHG statistics for 2015*; DECC (2016) *Final GHG statistics for 1990-2014*; CCC analysis.

Notes: Chart shows temperature-adjusted emissions in power, residential and non-residential buildings. This smooths out the large changes in heating emissions between years with mild and cold winters to give a clearer impression of genuine progress.

Évolutions sectorielles récentes des émissions de GES britanniques – source :
Source, « Meeting carbon budgets – 2016 progress report to parliament », juin 2016,
<https://www.theccc.org.uk/publication/meeting-carbon-budgets-2016-progress-report-to-parliament/>

On note que depuis 2014, le secteur de production d'énergie a perdu sa place de premier émetteur de gaz à effet de serre, au profit des transports et de l'industrie.

2.2. Des objectifs carbone qui requièrent de nouvelles politiques et mesures

De manière générale, en matière d'émissions de gaz à effet de serre, le Royaume-Uni est assujéti aux engagements de l'Union Européenne, au moins jusqu'à explicitation des conséquences de sa sortie de l'UE décidée par referendum en juin 2016. Les engagements de l'UE à l'horizon 2030 sont des émissions en baisse de -40 % par rapport à 1990. Au titre du partage des charges entre États membres, il a été proposé par la commission que le Royaume-Uni soit, comme la France, tenu à une baisse de 37 %. Il bénéficierait en outre d'une nouvelle marge de manœuvre de 0,4 % (1,5 % pour la France) donnant accès aux crédits du secteur de l'utilisation des terres. Il ne s'agit pour l'instant (août 2016) que de propositions de la Commission au Parlement et au Conseil.

Les objectifs nationaux britanniques vont au-delà des exigences européennes. Cela est possible en raison de la forte intensité en carbone de l'économie.

2.2.1. Une stratégie de budgets carbone quinquennaux de plus en plus ambitieux

En 2008 le « *Climate Change Act* » a établi des objectifs de réduction des émissions (les « *carbone budgets* ») qui à terme visent à réduire de 80 % les émissions en 2050 par rapport à 2010. Les budgets carbone jusqu'en 2027 sont les suivants ²⁹:

Royaume-Uni	Budget carbone 2008 2012	Budget carbone 2013 2017	Budget carbone 2018 2022	Budget carbone 2023 2027
Émissions sur 5 ans et moyennes (autorisées) par période, MtCO ₂ éq.	3018 604	2782 556	2544 509	1950 390
% réduction /1990	23 %	29 %	35 % en 2020	50 % en 2025

Tableau 2 : Budgets carbone du Royaume-Uni

Une intensification de l'effort est apparente à partir du 4ème budget carbone sur la période 2023-2027. De fait, comme on le verra *infra*, l'atteinte des trois premiers carbone ne suffit pas en soi pour garantir l'atteinte du 4ème budget carbone.

Le 5ème budget carbone, sur la période 2028-2032, a été l'objet d'une proposition à 1765 MtCO₂éq³⁰, soit une moyenne de 353 MtCO₂éq conduisant à une réduction de 55 % par rapport à 1990. Cette proposition a été acceptée durant l'été 2016 par le parlement britannique.

Si l'on compare les budgets carbone britanniques avec les budgets carbone de la stratégie nationale bas carbone (SNBC)³¹ française, décalés d'un an par rapport au calendrier britannique, on constate que les réductions attendues en France dans les budgets carbone successifs sont plus régulières :

France	Émission CO ₂ 2013	Budget carbone 2013 2017	Budget carbone 2018 2022	Budget carbone 2023 2027
Émissions sur 5 ans et moyennes (autorisée) par période, MtCO ₂ éq.	492	2210 442	1995 399	1790 358
% réduction /1990	11 %	20 %	28 %	32,4 %

Tableau 3 : Budgets carbone de la France, source : SNBC
[www.developpement-](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf)

²⁹ cf. <https://www.theccc.org.uk/tackling-climate-change/reducing-carbon-emissions/carbon-budgets-and-targets/>

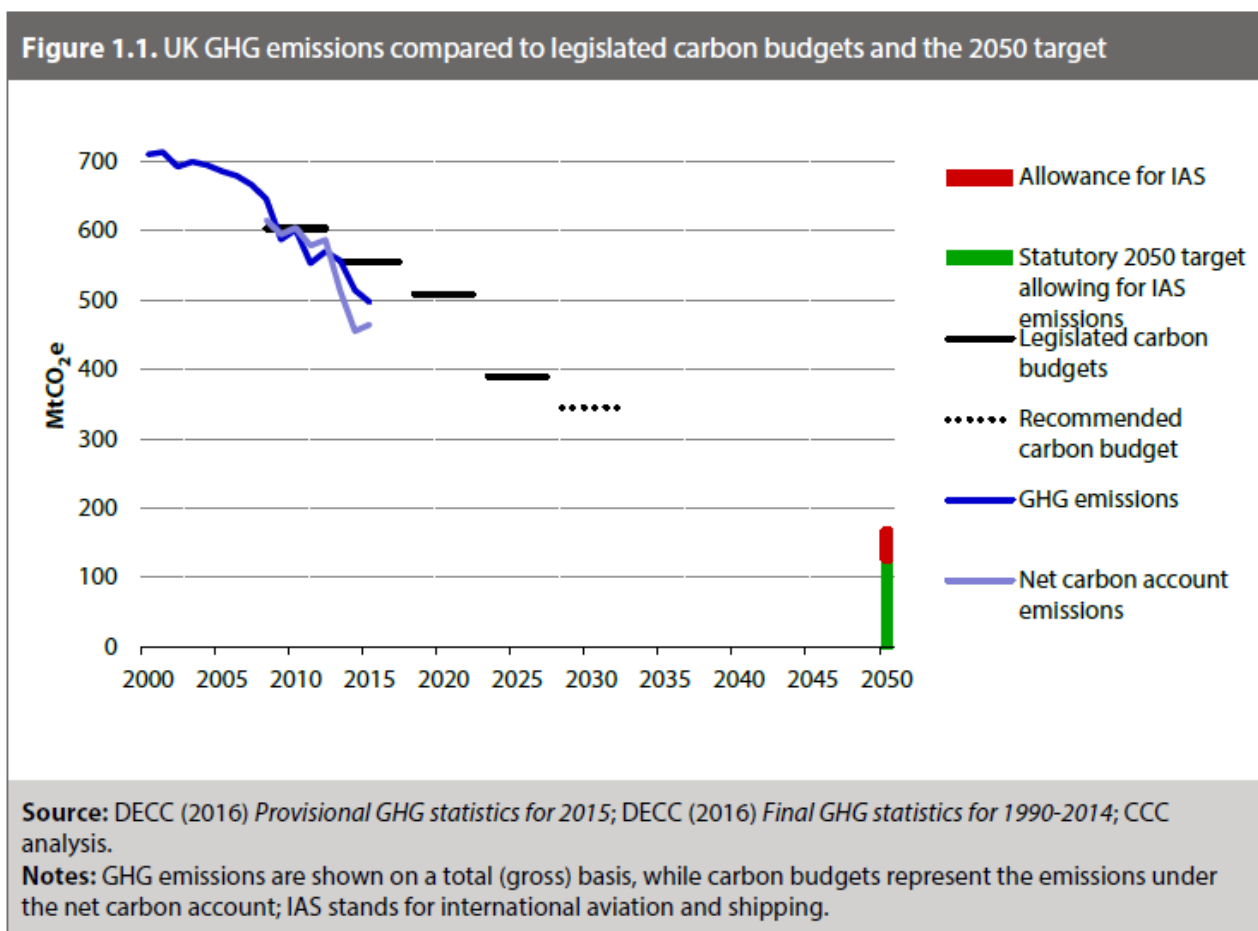
³⁰ Cf <https://www.theccc.org.uk/publication/the-fifth-carbon-budget-the-next-step-towards-a-low-carbon-economy/>

³¹ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

Les émissions des deux pays par habitant se rapprochent à horizon 2030.

2.2.2. Un réalisé encourageant en 2015 mais insuffisant pour 2030

En 2016, les émissions réalisées sont en ligne, voire meilleures que les objectifs.



Émissions britanniques déjà réalisées au regard des budgets carbone – source : Source, « Meeting carbon budgets – 2016 progress report to parliament », juin 2016, <https://www.theccc.org.uk/publication/meeting-carbon-budgets-2016-progress-report-to-parliament/>

Par exemple on atteint en 2015 (pendant la période du second budget carbone) les objectifs du 3^e budget carbone.

Cependant ces tendances prometteuses ne semblent pas permettre, en l'état des politiques et mesures, d'atteindre le budget carbone de la 4^e période 2023-2027, et plus généralement les objectifs d'étape de 2030.

2.2.3. Des politiques actuelles insuffisantes pour tenir les objectifs des budgets carbone à moyen terme

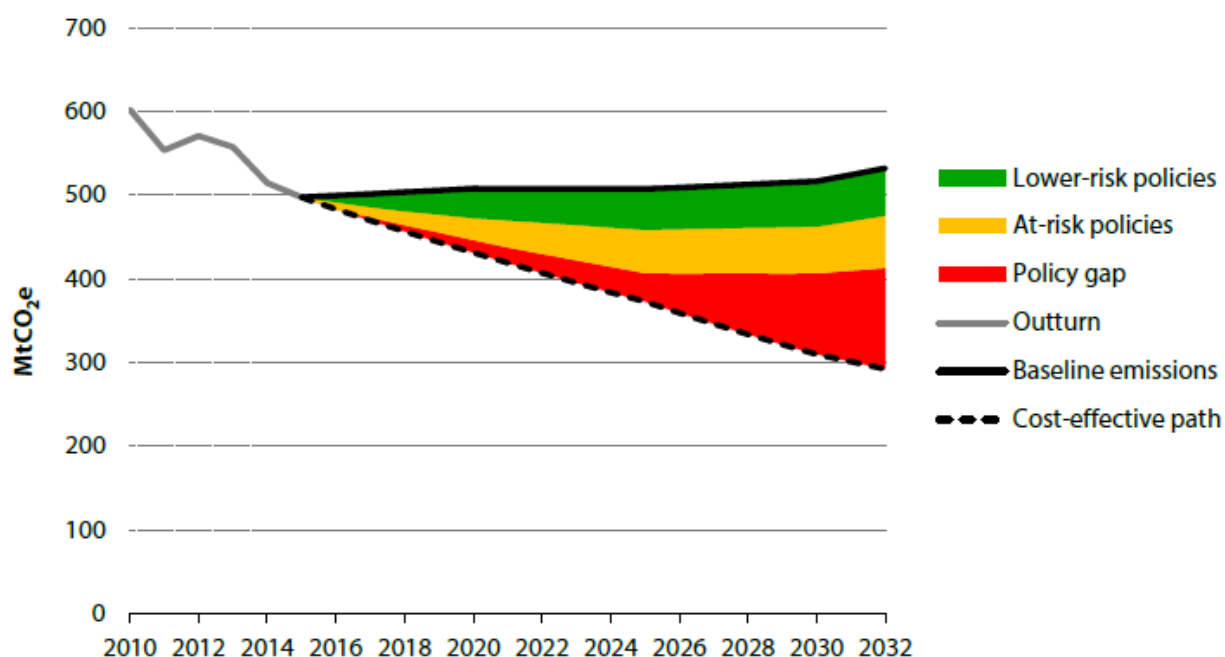
Pour la période 2012-2020, les priorités affichées du plan carbone rendu public en décembre 2011 étaient³²:

- l'isolation des bâtiments existants (l'objectif est de réduire de 24 % à 39 % les émissions entre 2009 et 2027),
- le remplacement du charbon par du gaz et de l'éolien off shore,
- la réduction de 17 % à 28 % des émissions du transport entre 2009 et 2027 en s'appuyant sur l'efficacité des moteurs et les biocarburants de 2e et 3e génération (algues). Une réduction des émissions (de 20 à 24 % de 2009 à 2027) sans désindustrialiser en incitant les industries à user des EnR (« *Renewable Heat Incentive* » équivalent à notre fonds chaleur) et en ayant recours à la CSC pour les centrales à gaz et à charbon.
- l'évolution du mix énergétique d'ici 2030 en ayant recours au nucléaire 10 à 30 GW, aux énergies renouvelables (35 à 50 GW), charbon et gaz équipés de CSC.

À l'aune de 2016, et malgré l'atteinte actuelle des objectifs, les mesures en place semblent insuffisantes pour atteindre de manière optimale économiquement les objectifs à l'horizon 2030 et 2050. Les politiques sont soit insuffisamment mises en œuvre, soit manquent complètement. Dans l'état actuel des politiques et mesures, même si elles sont mises en œuvre, la moitié seulement des réductions d'émissions escomptées en 2030 est atteignable, et il reste 100 MtCO₂eq d'émissions non prises en compte par les politiques existantes.

³² Rapport n°008378-01 du CGEDD en date de février 2013, « Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 »

Figure 2. Assessment of current policies against the cost-effective path to meet carbon budgets and the 2050 target



Source: DECC (2015) *Updated energy and emissions projections*; CCC analysis.

Notes: 'Lower-risk policies' (green) are those that aim to address known barriers and have sufficient funding and ambition to deliver with reasonable confidence. 'At-risk policies' (amber) either lack sufficient funding, do not address known barriers or have important design elements still to be confirmed. No funded policies exist to close the 'policy gap' (red), even though the Committee's scenarios identify abatement options to do so that are on the lowest cost path to meet the carbon budgets and the 2050 target. 'Baseline emissions' is the likely path of emissions in the absence of policy effort.

Écart entre objectifs et tendances selon les mesures – source : Source, « Meeting carbon budgets – 2016 progress report to parliament », juin 2016, <https://www.theccc.org.uk/publication/meeting-carbon-budgets-2016-progress-report-to-parliament/>

Les raisons de ces écarts sont identifiées et diverses. Si certains secteurs ont progressé (par exemple extension des financements jusqu'en 2026 pour l'éolien en mer, 2020-2021 pour la chaleur renouvelable et 2018 pour les véhicules électriques), d'autres ont reculé (annulation en novembre 2015 du programme de commercialisation pour la capture et séquestration du carbone -CSC, en anglais CCS-, réduction du financement pour l'efficacité énergétique, annulation du standard pour les bâtiments zéro carbone). Et certaines priorités stagnent : pas de nouvelles enchères prévues pour la production d'énergie bas carbone au plus bas prix (éolien terrestre et solaire en sites à potentiel avec acceptation locale), pas de plan d'action pour la chaleur décarbonée ou l'efficacité énergétique, pas de normes d'efficacité des véhicules prévues au-delà de 2020.

Les constats sectoriels du rapport de 2016 au Parlement portent notamment sur la thermique du bâtiment, la politique des transports au-delà de 2020, la CSC et la production énergétique bas carbone.

En matière de thermique du bâtiment, les améliorations d'efficacité énergétique marquent le pas : les taux annuels de travaux d'isolation des murs et combles ont décru de respectivement de 60 % et 90 % sur 2013-2015 par rapport à 2008-2012 ; la pénétration des pompes à chaleur et du chauffage urbain bas carbone reste marginale (0,5 % de la demande thermique en 2015). Il importe de développer des politiques claires et attractives pour les acteurs, informer les usagers, surmonter les barrières de comportement et renforcer l'offre et les compétences. La priorité est mise sur les segments les moins chers, à savoir les bâtiments neufs (qui devraient par défaut afficher une haute performance énergétique et de bas niveaux d'émission carbone) et les 4 millions de logements dispersés qui ne sont pas sur le réseau de gaz. Il faut noter que le gouvernement britannique a en particulier supprimé peu à peu toutes les aides et incitations financières en matière de bâtiment économe en énergie³³.

En matière de transports, les mesures en place sont adéquates jusqu'en 2020 et doivent être étendues au-delà avec un effort sur les émissions de CO₂ (avec des tests en conditions réelles, conduits correctement) et sur le développement du véhicule électrique (objectif souhaitable en 2030 : 60 % des ventes de véhicule neuf) et des infrastructures de recharge. D'autres mesures souhaitables sont l'atteinte (en énergie) de 8 % de biocarburants durables en 2020, la réduction de l'usage de la voiture (-5 % du tendanciel en voiture.km) au bénéfice des transports en commun, du vélo et de la marche, une réduction des émissions aéronautiques de 2050 au niveau de 2005 dans un contexte de croissance de 60 % de la demande.

La CSC est considérée comme décisive pour l'atteinte à moindre coût des objectifs d'émissions britanniques. Le programme de commercialisation du CSC annulé fin 2015 n'a pas été suivi d'une stratégie de développement adéquate du CSC. Cette dernière devrait différencier installations de capture du CO₂ et infrastructures de transport et stockage (qui ont des caractéristiques techniques et économiques différentes), privilégier le partage des infrastructures via des « clusters » de CSC en zones d'activité industrielle, inventer des financements innovants pour l'industrie, et répartir les différents risques sur les acteurs les plus à même de les supporter.

En matière de production d'énergie bas carbone, les dispositifs en place pour les énergies renouvelables mûres (éolien terrestre, solaire, biomasse durable) fonctionnent bien grâce à des enchères compétitives pour des « contrats pour différence » (CfD³⁴) de fourniture d'électricité. Une première enchère a eu lieu en 2015 et a été couronnée de succès, et des projets ultérieurs sont disponibles sans soutien gouvernemental au-delà de la valeur carbone publiée par le gouvernement (78£/tCO₂ en 2030). Mais ces enchères n'ont pas de suite prévue ce qui est regrettable compte tenu de la maturité et de la rentabilité des technologies. Un autre sujet est celui du renouvellement du parc électrique nucléaire, avec la nécessité de planification en cas de retard ou d'annulation de projets prévus. Est aussi souhaité le développement de mécanismes de flexibilité (stockage, interconnexion, réponse de la demande) et leur rémunération à leur juste valeur pour le réseau électrique.

En matière d'agriculture et UTCT (ces deux secteurs représentent 8 % des émissions 2014), il convient de moderniser les inventaires, renforcer le cadre politique au niveau

³³ voir document de la DG Trésor de janvier 2014, d'analyse comparative dans 8 pays « les politiques mises en place pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants... » http://intra.daei.sg.i2/IMG/pdf/Rapport_ECI_performance_energetique_des_batiments_cle012c8c.pdf

³⁴ Cf <https://www.gov.uk/government/publications/electricity-market-reform-contracts-for-difference> ; dans le présent contexte, un CfD est un contrat privé entre un producteur d'électricité bas carbone et une entreprise de contrats bas carbone (LCCC) propriété de l'État. Le producteur reçoit la différence entre le prix cible de production d'électricité avec sa technologie bas carbone (« strike price ») et le prix de référence (mesure du prix moyen de l'électricité sur le marché britannique).

international, et surmonter les barrières (financières et autres) à l'afforestation et à l'agro-forêt.

En matière de déchets (3 % des émissions), les émissions devraient décroître de 50 % entre 2014 et 2030.

En matière de gaz fluorés (3 % des émissions 2014) la mise en œuvre et le renforcement des réglementations existantes apparaît opportune.

Ainsi, pour tenir les objectifs d'émission, un effort supplémentaire apparaît donc nécessaire dans tous les secteurs.

2.2.4. Des politiques et mesures supplémentaires nécessaires

Le potentiel de réduction d'émissions par secteur à l'horizon 2030 est notamment basé sur la décarbonation de l'énergie (en production mais aussi dans les transports avec des véhicules à basses émissions, dans le bâtiment avec le recours à de la chaleur décarbonée) et l'efficacité énergétique (dans l'énergie, les transports, le bâtiment, l'industrie) ³⁵ :

³⁵ Cf <https://www.theccc.org.uk/publication/meeting-carbon-budgets-2016-progress-report-to-parliament/>, juin 2016

Table 1.3. Emissions reduction potential in 2030 to meet the recommended fifth carbon budget			
Sector and 2015 emissions	Abatement option	Emission savings in 2030	
		MtCO₂e	% of total savings
Power 102 MtCO ₂ e	Improved efficiency of electricity use	71	35%
	CCS commercialisation to 2030		
	Offshore wind to 2025		
	Other low-carbon generation to 2030		
Domestic transport 120 MtCO ₂ e	Ultra-low emission cars and vans	25	13%
	Improved efficiency of cars and vans	17	8%
	HGVs - improved efficiency, ultra-low emission	9.5	5%
	Biofuels increased to 10% penetration	7.5	4%
	Reduced travel demand	3	2%
	Other actions in transport	2.5	1%
	Total domestic transport	65	32%
Buildings 88 MtCO ₂ e	Low-carbon heat, incl. biomethane to gas grid	15	7%
	Residential energy efficiency	6	3%
	Public and commercial energy efficiency	5	2%
	Total buildings	26	13%
Industry 113 MtCO ₂ e	Improved energy efficiency	5	2%
	Fuel switching	3.5	2%
	CCS commercialisation to 2030	3	1%
	Low-carbon heat, incl. biomethane to gas grid	2.5	1%
	Total industry	14	7%
F-gases 17 MtCO ₂ e	Phasedown of HFC use	12	6%
Agriculture & land use 40 MtCO ₂ e	Afforestation and agro-forestry	2.5	1%
	Crops and soils measures	2	1%
	Livestock measures	2	1%
	Other actions in agriculture	3.5	1%
	Total agriculture and land use	10	5%
Waste 18 MtCO ₂ e	Reduced biodegradable waste to landfill and increased methane capture	4	2%
Source: DECC (2016) <i>Provisional GHG statistics for 2015</i> ; CCC analysis. Notes: 2015 emissions are provisional. Totals may not sum due to rounding.			

Potentiel de réduction d'émissions en 2030 par secteur, requises pour atteindre le cinquième budget carbone – Source, « Meeting carbon budgets – 2016 progress report to parliament », juin 2016, <https://www.theccc.org.uk/publication/meeting-carbon-budgets-2016-progress-report-to-parliament/>

La démarche d'anticipation du Royaume-Uni, pour l'instant en avance de ses objectifs d'émissions mais conscient des difficultés à l'horizon 2025-2030, est louable. Les mesures proposées restent cependant fragiles pour certaines d'entre elles (comme le recours important au CSC), et les incertitudes des estimations proposées ne sont pas explicitées.

2.3. Le rapport DDPP 2015 sur le Royaume-Uni

Le rapport DDPP de 2015 sur le Royaume-Uni « pathways to deep decarbonization in the United Kingdom »³⁶ prend acte du rôle précurseur du Royaume-Uni en matière d'établissement d'objectifs législatifs de mitigation à long terme avec notamment la mise en place de budgets carbone quinquennaux. Selon les modélisations britanniques, des réductions significatives des émissions sont possibles, à des coûts gérables, et cette transition doit permettre de traiter de vieux problèmes comme le remplacement de la capacité de production du secteur énergétique, le recours aux ressources renouvelables locales pour réduire les importations d'énergies fossiles, et l'efficacité énergétique pour réduire la précarité énergétique. Cependant le chemin optimal reste à déterminer.

Le rapport DDPP fait quelques constats clé.

Il est indispensable de réduire les émissions du secteur de production d'électricité de 85 à 90 % en 2030 par rapport à 1990 afin de préparer le chemin pour une électrification ultérieure des usages. De plus ce secteur est celui où les efforts sont les plus rentables en termes de réduction d'émissions, et ce d'autant plus que le renouvellement du parc est une question actuelle. Cependant pour atteindre cette rentabilité il est besoin de technologies bas carbone spécifiques, notamment le nucléaire et la CSC (capture et séquestration du carbone). Si l'on doit utiliser du gaz après 2040 ce doit être dans le contexte de la CSC, pour la production d'électricité et d'hydrogène. Il est donc impératif que la politique énergétique se concentre d'abord sur le développement de la technologie CSC (via une forte coopération internationale) et non pas le développement de nouvelles ressources fossiles. Le Royaume-Uni doit aussi développer les secteurs où il a une expertise spécifique, notamment l'éolien en mer et les énergies marines. La bioénergie a un potentiel mais celui-ci est limité par la disponibilité de biomasse, et en fin de compte ne pourra représenter que 15 à 20 % de l'énergie primaire britannique au mieux.

Par ailleurs des efforts plus soutenus sont requis pour réduire la demande en énergie, et notamment en matière de rénovation énergétique des bâtiments existants (avec des solutions à bas coût pour les bas revenus exposés à la précarité énergétique), de réduction de la demande de transport et de report modal. L'amélioration de l'efficacité énergétique est tributaire d'une meilleure compréhension de la réponse des consommateurs aux prix de l'énergie, et des interactions entre institutions et société.

Les secteurs d'utilisation finale sont censés être électrifiés en 2050 à hauteur de 30 à 40 % (en énergie finale) soit un doublement par rapport aux niveaux actuels. Des obstacles sont le remplacement du gaz par l'électricité dans le résidentiel, difficile en raison de la pointe hivernale, et l'hypothèse d'utilisation des batteries pour les seuls véhicules légers.

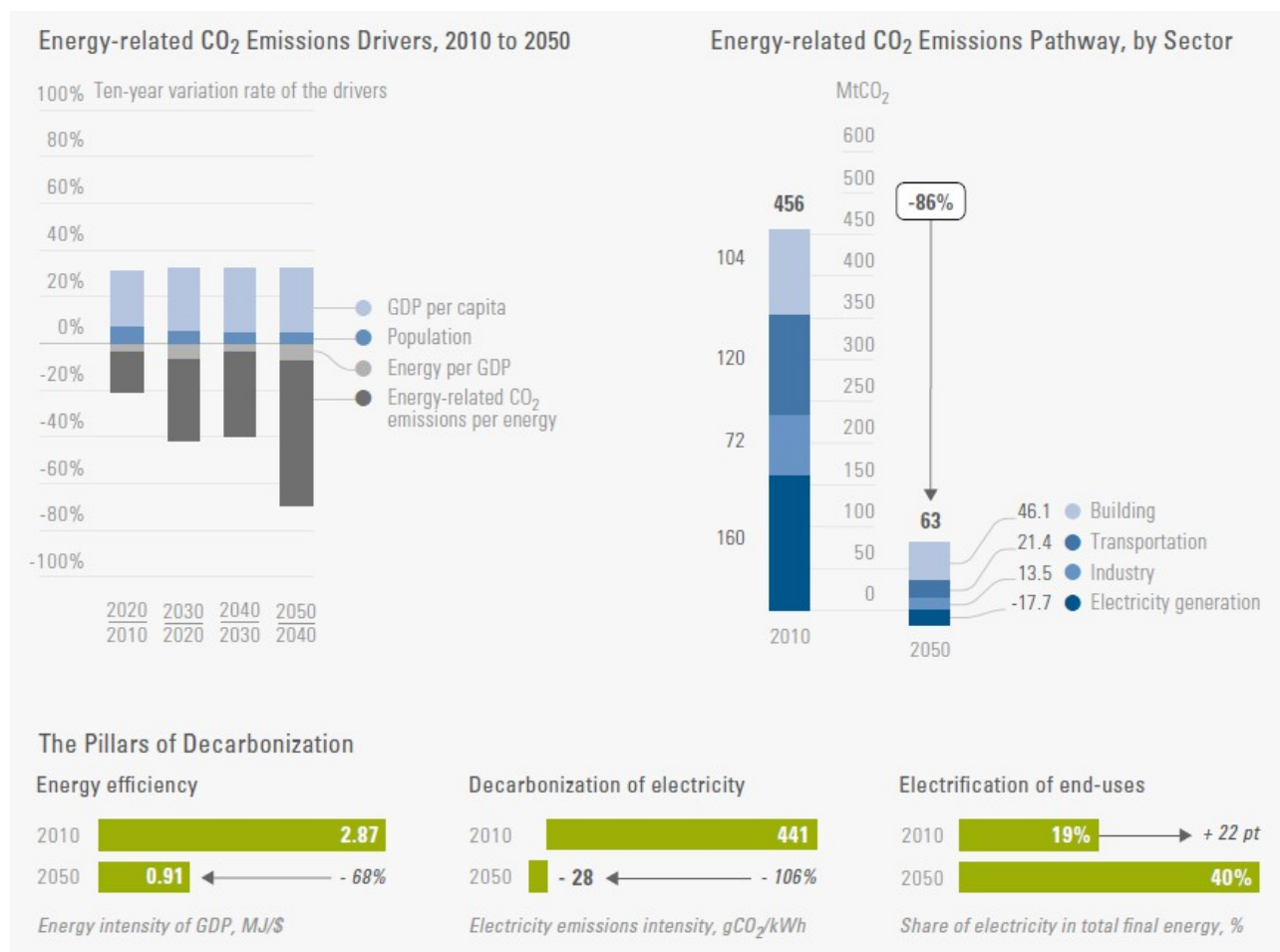
Enfin, la seule approche technologique des émissions britanniques serait sans doute vouée à l'échec en raison des émissions difficilement réductibles des secteurs

³⁶ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf

résiduels, comme les émissions de GES hors CO₂ et l'aviation internationale, qui représenteraient 70 % des émissions résiduelles en 2050. Cette part importante de l'aviation internationale à terme si rien de substantiel n'est fait, n'est pas spécifique au Royaume-uni. Une impulsion politique forte et durable est donc requise, avec des ambitions accrues d'année en année. Et l'objectif de 2050 doit être réévalué par le gouvernement, et éventuel durci sur des bases scientifiques, puisque les budgets du GIES indiquent clairement que peu après 2050 il sera nécessaire d'atteindre des émissions nettes nulles.

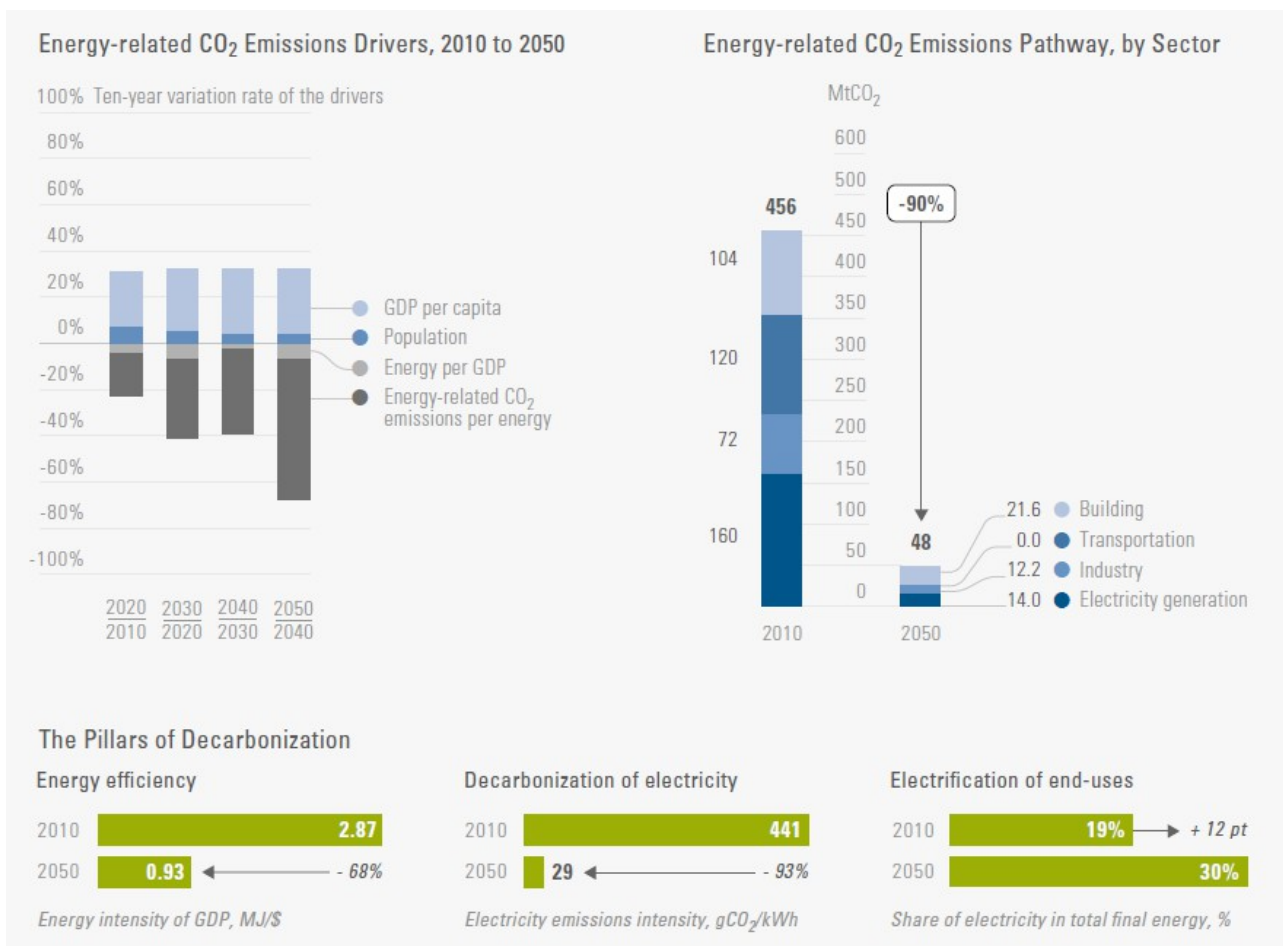
Le rapport DDPP propose aussi trois scénarios illustratifs : « decarbonize and expand », « multi vector », « reduced demand ». Ces trois scénarios atteignent des réductions d'émissions de GES comprises entre 83 % et 90 % en 2050 par rapport à 1990. Ils supposent, entre autres, des investissements conséquents dans le système de production électrique (investissements inévitables de toute façon à court terme), un recours important aux technologies de CSC (capture et séquestration du carbone) et un prix favorable (élevé) du carbone.

Le scénario « D-exp » (« decarbonize and expand ») met l'accent sur une décarbonation rapide du secteur de production d'électricité en recourant à des technologies bas carbone dont l'éolien et le nucléaire. La CSC (capture et séquestration du carbone) prend un rôle croissant peu avant 2030. Ces déploiements permettent une électrification croissante des usages finaux. Les pompes à chaleur se développent largement et l'électricité remplace le gaz comme première source de chaleur. Dans les transports, l'électrification des véhicules légers augmente dans les années 2030 avec une dominance des véhicules électriques et hybrides rechargeables dans les années 2040.



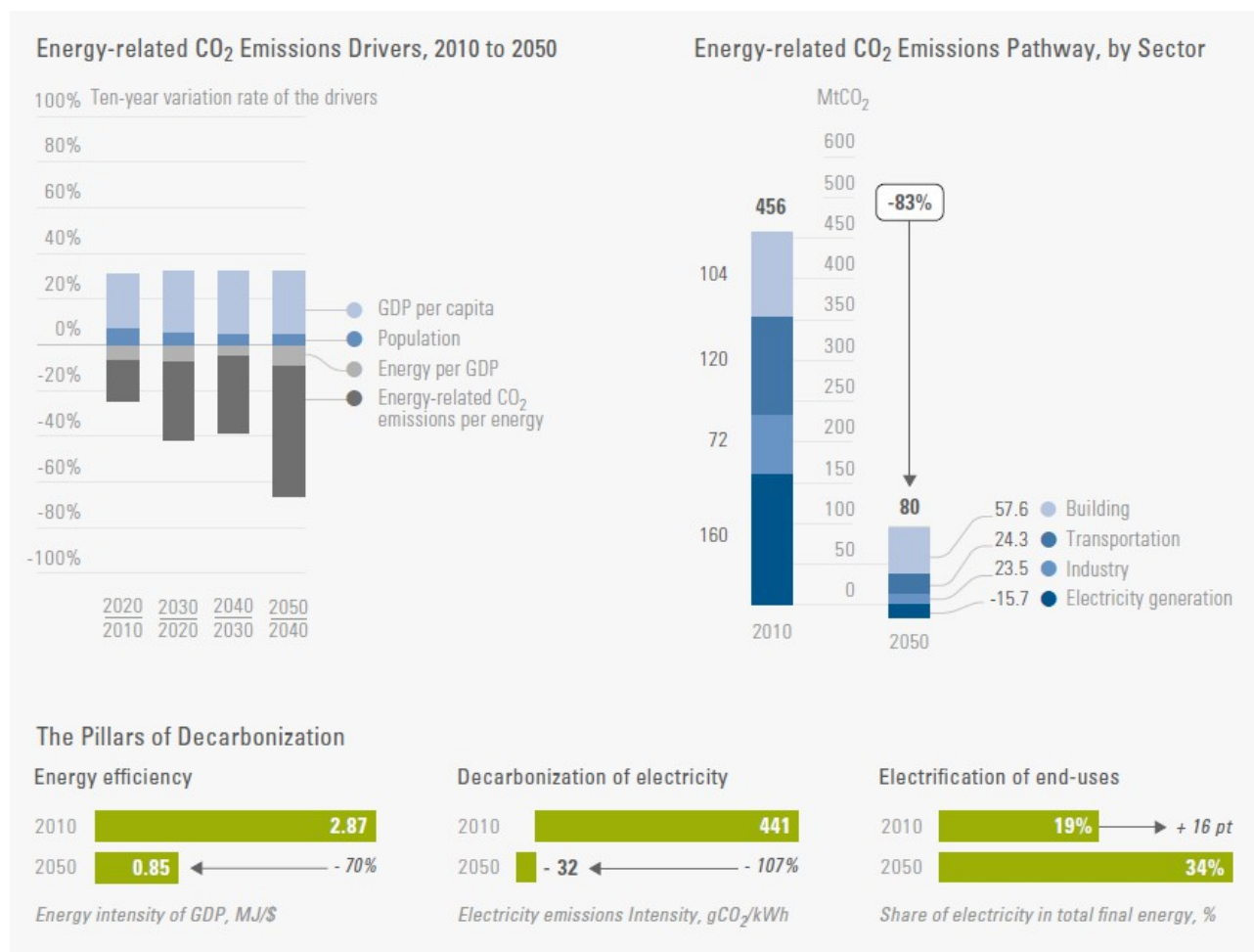
Scénario « décarbonation et expansion » – Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf

Le scénario « M-vec » (multi vector transition «), lui, suppose un moindre déploiement des technologies bas carbone comme le nucléaire et la CSC, et donc compte moins sur l'électrification. La capacité éolienne est par contre supérieure à celle du scénario précédent « D-exp », ce qui pose des problèmes plus ardues pour la conduite du système électrique : gestion de l'intermittence, des creux et des pics de production. Il en résulte une capacité électrique installée supérieure (c'est le scénario qui suppose les investissements les plus élevés dans le système électrique), malgré une moindre électrification. De plus d'autres secteurs, comme l'hydrogène et la bioénergie, jouent après 2030 un bien plus grand rôle dans la décarbonation de l'économie.



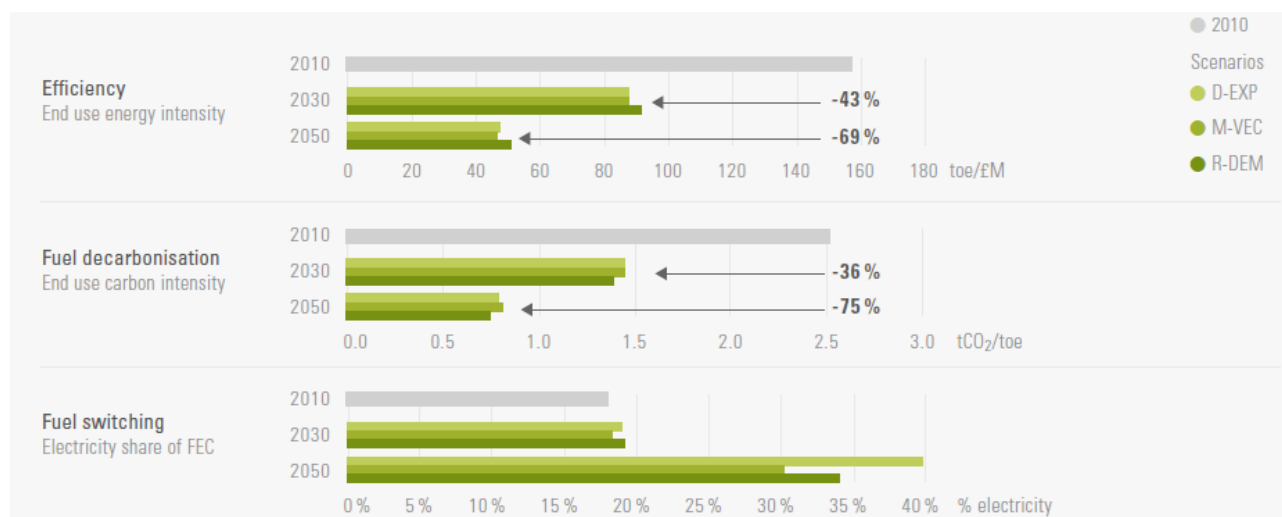
Scénario « Multi vector » – Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf

Le scénario « R-dem » (« reduced demand ») illustre l'effet d'une demande réduite, avec la possibilité corollaire d'une offre réduite. L'accent est dans ce scénario mis sur la rénovation thermique des bâtiments avec prise en compte des problèmes de coût abordable et de précarité énergétique. De plus la demande en transports est réduite au moyen d'incitations fiscales et de mesures locales.

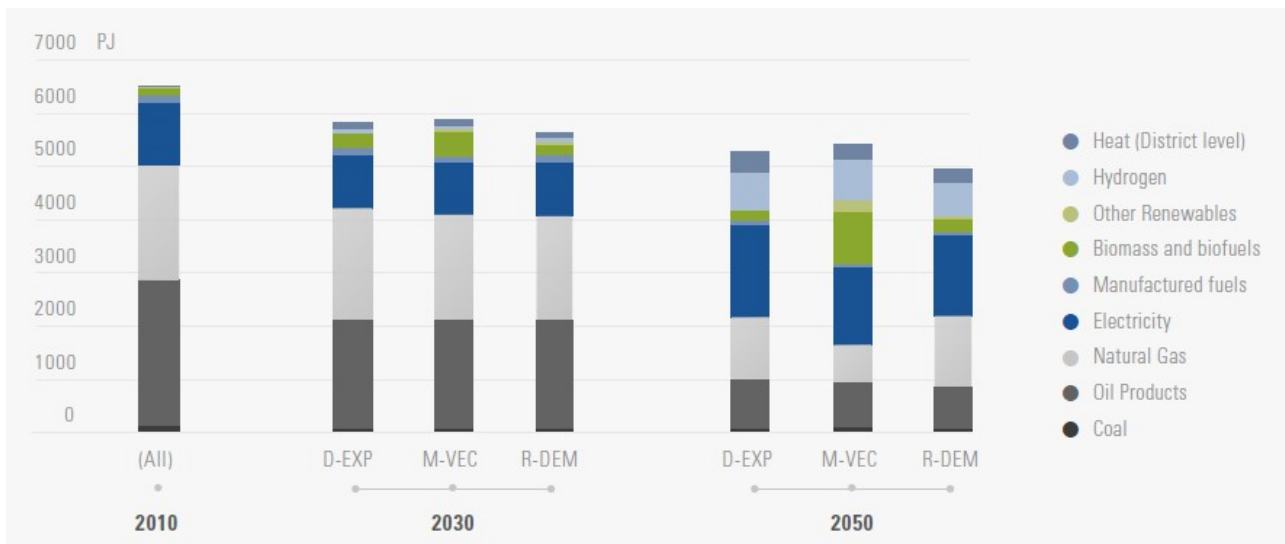


Scénario « reduced demand » – Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf

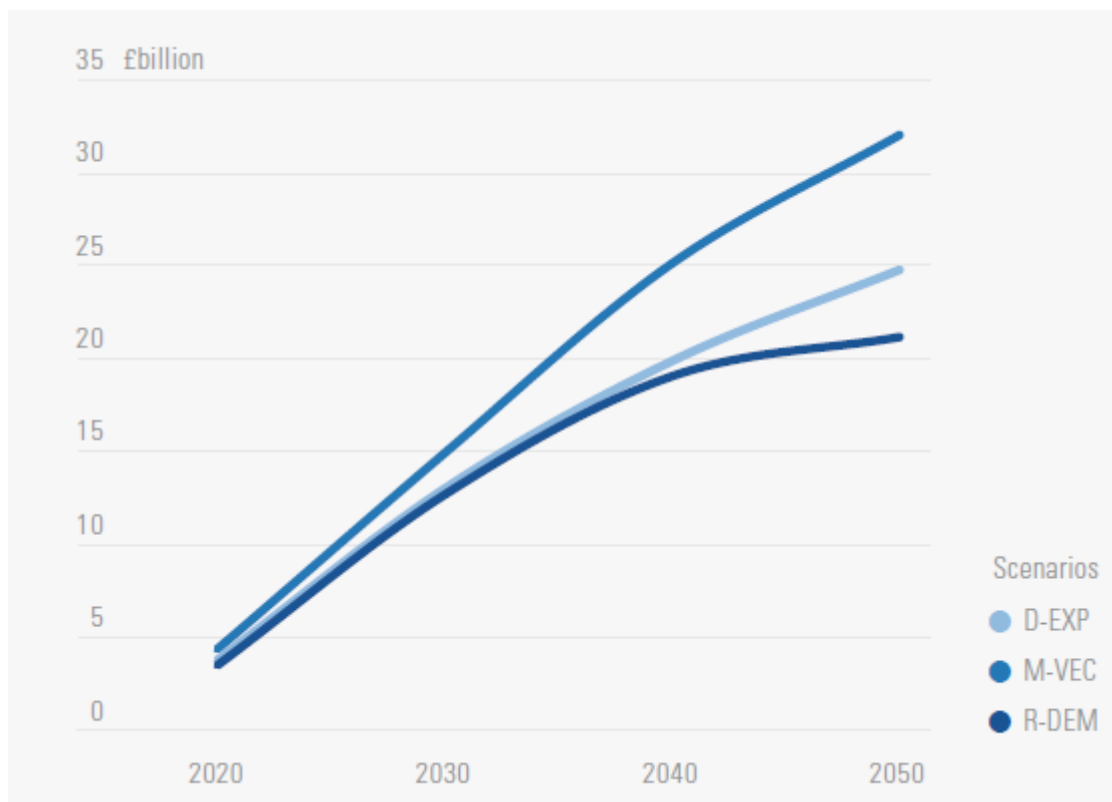
Des éléments descriptifs des trois scénarios sont récapitulés dans les figures ci-dessous.



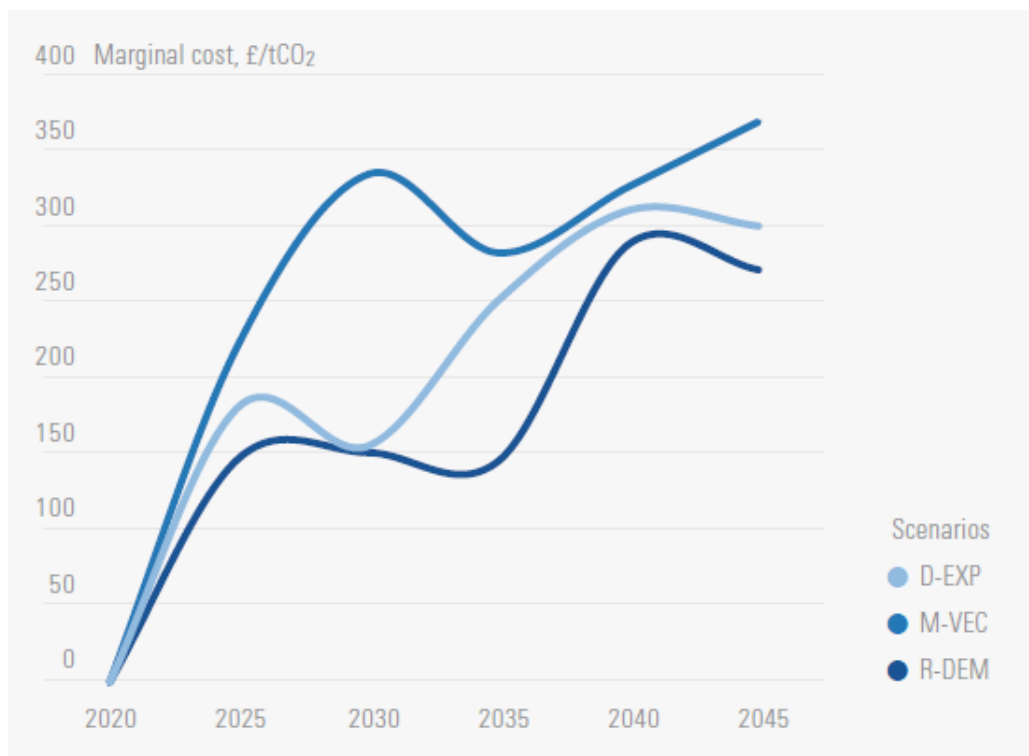
Importance des « trois piliers » de la décarbonation de l'économie (efficacité, décarbonation des combustibles, substitution des combustibles) dans les trois scénarios considérés – source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf



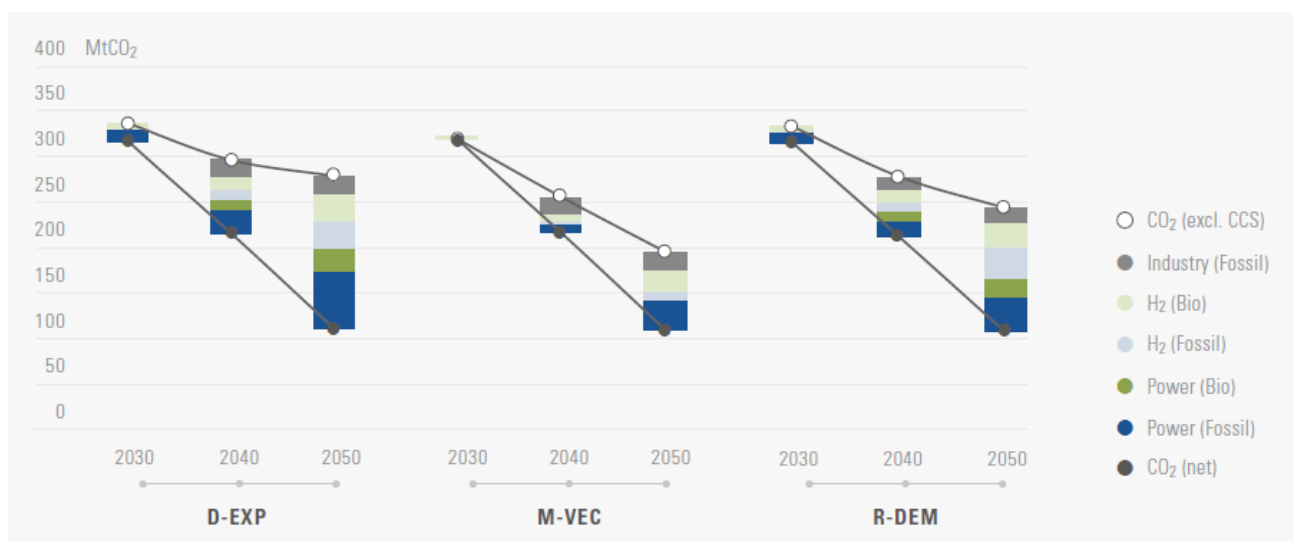
Trajectoires énergétiques des trois scénarios considérés - source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf



Investissement annuel dans le secteur de production d'électricité dans les trois scénarios considérés - source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf



Prix du carbone dans les trois scénarios considérés - source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf

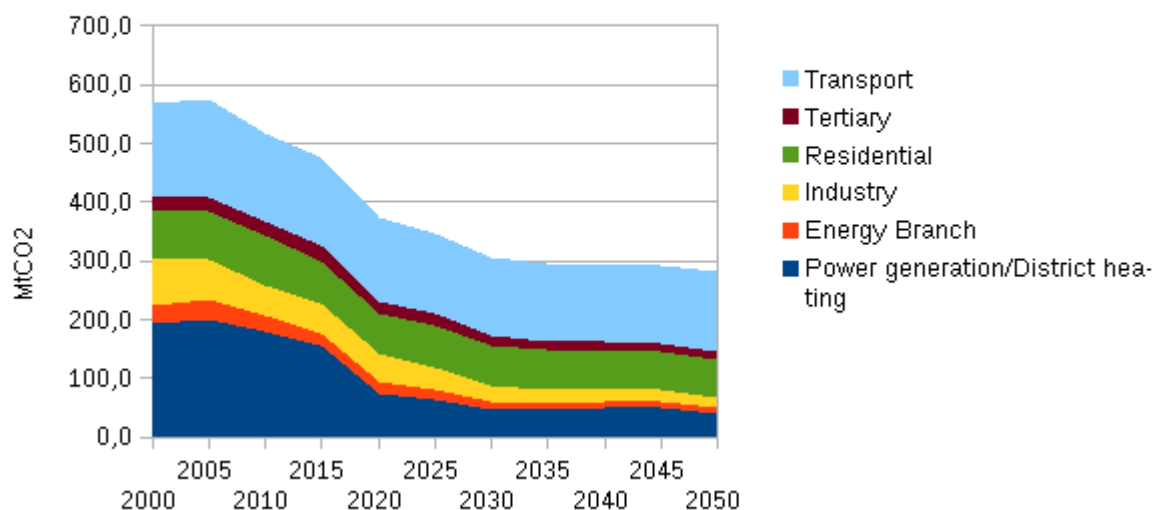


Contribution de la CSC à la réduction des émissions de GES dans les trois scénarios considérés entre 2030 et 2050 - source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_GBR.pdf

2.4. Le scénario de référence de l'UE 2016

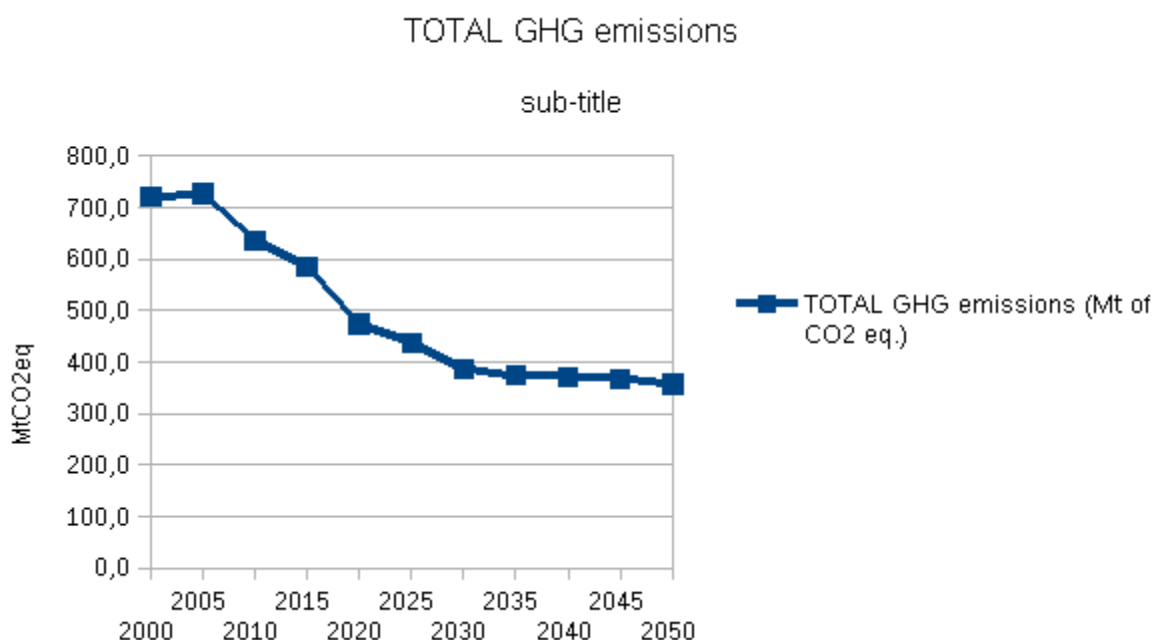
Le 20 juillet 2016 la Commission européenne a publié ses dernières projections dans un document « EU Reference Scenario 2016 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050 »³⁷. Les conclusions de ces projections (qui ne prennent en compte que les objectifs -légalement contraignants- de 2020 mais pas (encore) ceux de 2030, en matière d'émissions de CO₂ et de GES pour le Royaume-Uni, sont les suivantes :

CO₂ emissions (energy related)



Émissions de CO₂ au Royaume-Uni par secteur – Source, mission sur la base de données issues de <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/AppendixRefSce.xls>

³⁷ Voir <https://ec.europa.eu/energy/en/news/reference-scenario-energy>,
<http://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-modelling>,
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf,
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160712_Summary_Ref_scenario_MAIN_RESULTS%20%282%29-web.pdf



Émissions de GES au Royaume-Uni – Source, mission sur la base de données issues de <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/AppendixRefSce.xls>

Ces projections -a priori pessimistes car n'incluant pas les politiques agréées pour 2030- confirment cependant l'insuffisance des mesures existantes au-delà de 2020.

2.5. Conclusion

Le Royaume-Uni a d'ores et déjà, en 2016, beaucoup progressé et atteint ses objectifs 2020 spécifiés dans les budgets de sa stratégie bas carbone. Ceux-ci sont en fait relativement faciles à atteindre et les efforts les plus importants sont repoussés à l'horizon 2030 et au-delà. Des mesures significatives nouvelles seront nécessaires pour atteindre les objectifs de 2030, qui incluent le recours à des technologies non encore nécessairement disponibles comme le CSC.

Par rapport à la France, en ayant des émissions par habitant aujourd'hui voisines mais avec un mix énergétique bien différent, le Royaume-Uni met plus l'accent sur la réduction des émissions dans la production de l'énergie et dans une moindre mesure les transports et met moins l'accent sur la diminution des émissions dans l'habitat pour les années à venir. La sortie du Royaume-Uni de l'Union européenne pourrait également à l'avenir avoir un impact sur sa stratégie carbone (priorités, changement de modèle économique) dans des directions qui restent à préciser. Le changement récent de gouvernement du Royaume-Uni et la suppression du "Department for Energy and Climate Change" dont les activités ont été regroupées au sein du "Department for Business, Energy and Industrial Strategy" laisse cependant entrevoir le risque d'une volonté moins affirmée de lutter dans les années à venir contre les émissions de GES.

3. Allemagne

3.1. Des émissions de GES stables voire en croissance

Les émissions allemandes de GES selon le ministère fédéral de l'environnement se montaient en 2013 à 953 MtCO₂éq soit 75,6 % des émissions de 1990 (1260 MtCO₂éq, voir *infra*)³⁸. Selon Eurostat les émissions de 2013 représentaient 77,02 % des émissions de 1990 (76,56 % sans l'aviation), et 73,5 % en 2014 (73,04 % sans l'aviation).³⁹ L'Allemagne est le premier émetteur de GES de l'UE.

Rapporté à la population à l'époque (80 M habitants) cela représente 11,9 tCO₂éq par habitant, contre 7,3 pour la France. Les données d'Eurostat, pour leur part, indiquent pour l'année 2014 (resp. 2013) des émissions de 11,45 tCO₂éq/habitant pour l'Allemagne (resp. 11,81) contre 7,22 pour la France (resp. 7,67).

Sur la base de la décomposition des émissions par secteur explicitée dans le tableau issu du rapport annuel du gouvernement⁴⁰, ces 11,9 t se répartissent en :

- 4,7 t CO₂éq pour l'énergie (moyenne européenne 2013 = 2,6 t)
- 2,0 t pour les transports (moyenne européenne 2013 = 1,7 t) ;
- 2,3 t pour l'industrie (moyenne européenne 2013 = 1,7 t) ;
- 1,8 t pour le résidentiel / tertiaire (moyenne européenne 2013 = 1,0 t) ;
- 0,9 t pour l'agriculture (moyenne européenne 2013 = 1,0 t).

Les évolutions récentes montrent peu de progrès depuis 2007, avec même une augmentation des émissions après 2011, suite à la sortie du nucléaire et le recours à des centrales à charbon et au lignite.

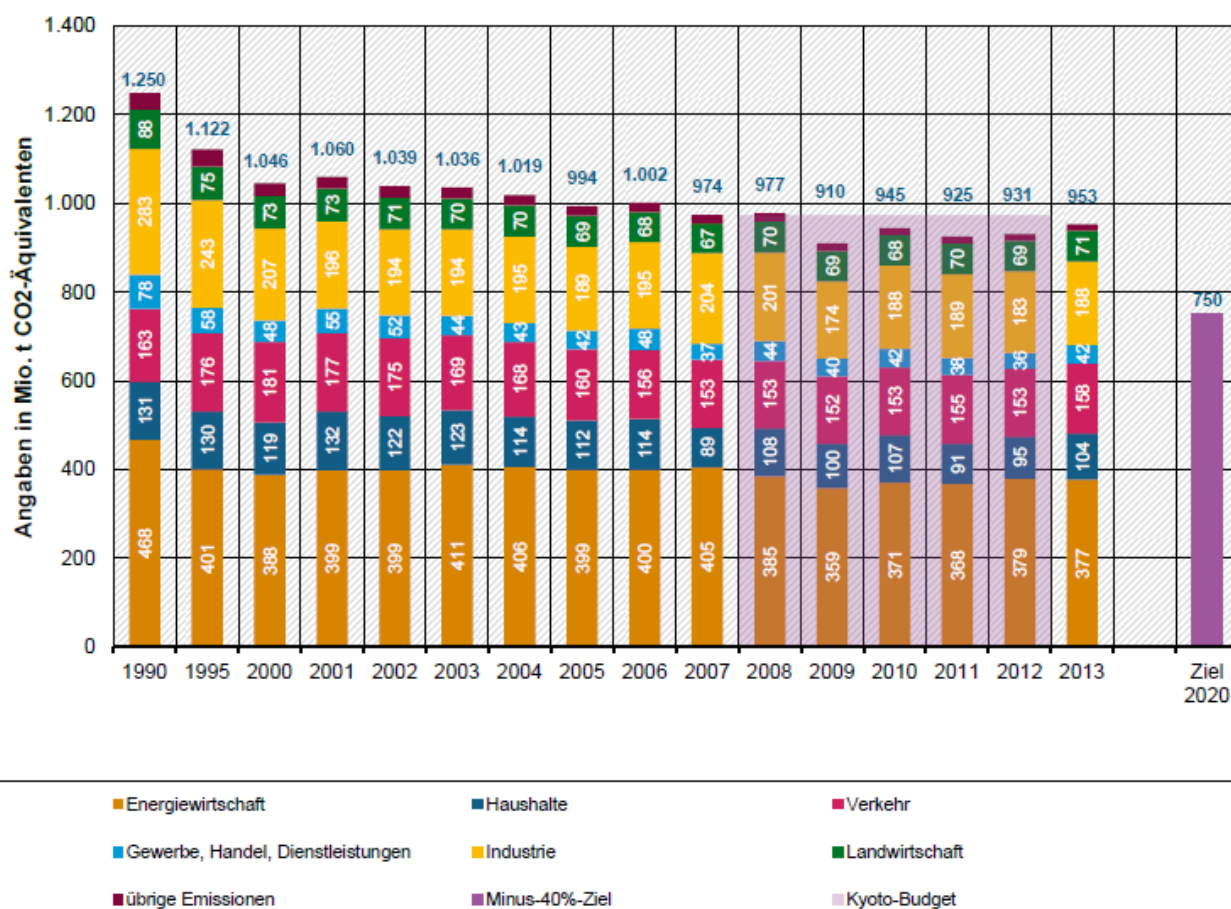
³⁸ http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/entwickl_treibhausgase_missionen_sektoren_bf.pdf

³⁹ <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdcc100&language=en>

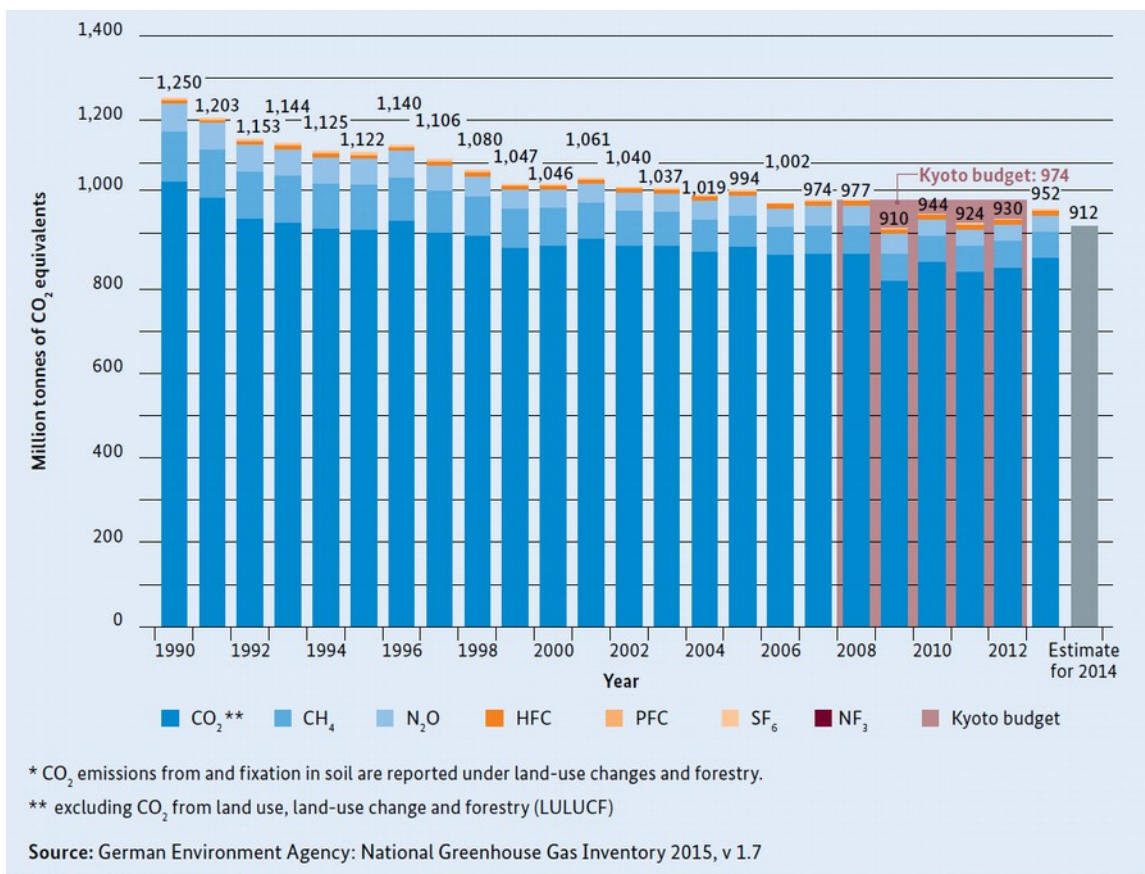
⁴⁰ http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_eng_bf.pdf

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland

nach Sektoren



Émissions allemandes de gaz à effet de serre entre 1990 et 2013, déclinées par secteurs (de bas en haut énergie, logements, transports, entreprises commerce et service, industrie, agriculture, autres - Source : Ministère fédéral en charge de l'environnement, <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/berichterstattung/>)



Émissions allemandes de gaz à effet de serre entre 1990 et 2013, déclinées par gaz à effet de serre - Source : Ministère fédéral en charge de l'environnement, climate action report 2015, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_eng_bf.pdf

3.2. Des objectifs ambitieux difficiles à tenir

De manière générale, en matière d'émissions de gaz à effet de serre, l'Allemagne est assujettie aux engagements de l'Union Européenne.

Dans la première période d'engagement du protocole de Kyoto (2008-2012), l'Allemagne avait un objectif de réduction de ses émissions de 21 % par rapport à 1990 et l'a dépassé.

Les engagements de l'UE à l'horizon 2020 (paquet énergie climat 2020) sont des émissions en baisse de 20 % par rapport à 1990⁴¹, et l'actualisation de 2014 du paquet énergie climat (dit paquet énergie climat 2030) visent une réduction de 30 % en 2030 par rapport à 1990.

⁴¹ Pour mémoire il a été proposé en juillet 2016 par la commission, au titre de la répartition des charges entre États membres (secteur ESD, c'est-à-dire hors ETS), que l'Allemagne soit tenue à une baisse de 38 % (37 % pour la France). Il bénéficierait en outre d'une nouvelle marge de manœuvre de 0,5 % (1,5 % pour la France) donnant accès aux crédits du secteur de l'utilisation des terres. Il ne s'agit pour l'instant (août 2016) que de propositions de la Commission au Parlement et au Conseil.

3.2.1. Les objectifs du plan « Energiekonzept » : -40 % en 2020 par rapport à 1990, -55 % en 2030, -80 à 95 % en 2050 ; et les mesures afférentes

Les objectifs nationaux allemands (-40 % en 2020 soit 760 MtCO₂éq, -55 % en 2030), datant du plan « Energiekonzept » de 2010, lui-même appuyé sur le programme intégré énergie et climat (IEK) de 2007, vont au-delà des exigences européennes (-20 % en 2020, -40 % en 2030).

Cela a été en 2010 jugé possible en raison de la forte intensité en carbone de l'économie. L'accident de Fukushima en 2011 n'a pas remis en cause ces ambitions qui ont été confirmées et renforcées dans le traité de coalition gouvernementale en 2013.

3.2.1.1. Le plan Energiekonzept

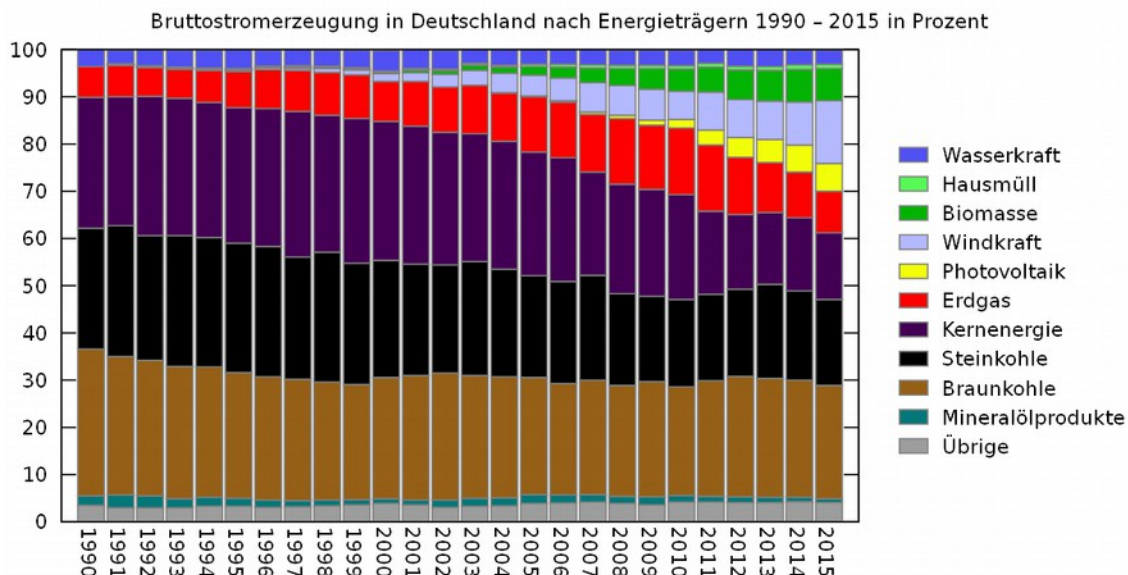
Le plan « Energiekonzept » de 2010 a notamment défini quatre objectifs :

- réduction des émissions de GES de 40 % d'ici 2020, 55 % à 2030 et 80 à 95 % en 2050 par rapport à 1990 ;
- énergies renouvelables produisant 18 % de l'énergie finale consommée en 2020 et 60 % en 2050 ;
- baisse de la demande énergétique de 20 % en 2020 et 80 % en 2050, inégalement répartie : baisses de 10 % et 25 % respectivement pour la consommation électrique, mais de 20 % et 80 % pour la chaleur dans le bâtiment ;
- diminution de 2,1 %/an de l'intensité énergétique (consommation d'énergie nécessaire pour produire 1€ de PIB)

Selon le rapport CGEDD de 2013, « cet ambitieux programme nécessite à la fois un recours accru dans un premier temps au charbon, au gaz et au lignite (environ 30 000 MW de centrales thermiques fossiles sont en construction ou en projet), et un développement à marche forcée des EnR : l'Allemagne vise une proportion d'éolien, de solaire, de biomasse et d'hydraulique de 80 % dans son mix électrique 2050, contre 20 % en 2011, et 35 % en 2020. Cette politique est essentiellement soutenue par des tarifs très élevés de rachat de l'électricité, assumés par le consommateur, pour financer les énormes investissements de production et de transport nécessaires ».

3.2.1.2. La loi EEG sur les énergies renouvelables

De fait l'Allemagne est actuellement une « vitrine » pour les énergies renouvelables, notamment éolien et photovoltaïque, par le biais de sa célèbre loi sur les énergies renouvelables (*Erneuerbare-Energien-Gesetz*, en abrégé « EEG » ; en anglais, *Renewable energy sources act* ou « RES Act »), initialement entrée en vigueur le 1er avril 2000 et créant des tarifs d'achat dédiés pour l'énergie renouvelable. Elle a clairement eu un effet sur le mix énergétique électrique allemand :



Mix énergétique électrique allemand de 1990 à 2015, en pourcentage, avec de haut en bas: hydroélectricité, déchets ménagers, biomasse, éolien, photovoltaïque, gaz naturel, nucléaire, charbon, lignite, hydrocarbures, autres
– Source: <https://de.wikipedia.org/wiki/Erneuerbare-Energien-Gesetz>

Entre 2000 et 2013, la capacité installée électrique en énergies renouvelables est passé de 12,3 GW à 85 GW.⁴²

En 2014 la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité a atteint 27,4 % contre 25,2 % l'année précédente (pour rappel l'objectif est 40 à 45 % en 2025), avec une production de 161 TWh⁴³ ; la part des énergies renouvelables dans l'utilisation finale de chaleur a atteint 12,2 % pour un objectif de 14 % en 2020 ; la part dans les transports atteint 5,6 % ; ce recours aux énergies renouvelables représente 151MtCO₂éq évitées en 2014, dont 110 MtCO₂éq évitées dans le domaine de la production d'électricité ; l'investissement pour cela a été de presque 19 Mds€ ; la conduite des installations a créé des impulsions économiques à hauteur de 14 Mds€.⁴⁴

La part d'électricité renouvelable dans la consommation brute d'électricité a en 2014 augmenté pour atteindre 27,4 % (soit 171 TWh⁴⁵), mais sans charge supplémentaire liée à l'EEG (similaire à la CSPE française) pour le consommateur.

Un amendement de 2014 à cette loi sur les sources d'énergie renouvelables (EEG 2014) définit un corridor pour la part d'énergie renouvelable à atteindre dans la production d'électricité, à savoir entre 40 % et 45 % en 2025, et entre 55 % et 60 % en 2035, à atteindre de manière aussi économique que possible. La loi requiert un rythme d'installation de nouvelle capacité significatif (typiquement 2,5 GW/an pour l'éolien terrestre, 2,5 GW/an pour le photovoltaïque, entre autres).

⁴² <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-energiegewinnung-energieverbrauch,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>

⁴³ dont 56 TWh d'éolien terrestre, 35 TWh de photovoltaïque, 29 TWh de biogaz, 19,6 TWh d'hydraulique

⁴⁴ http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/erneuerbare-energien-in-zahlen-2014.pdf?__blob=publicationFile&v=4

⁴⁵ TWh : terawattheure, soit un milliard de kilowattheures ; un million de tonnes équivalent pétrole (Mtep) correspond à 11,6 TWh.

Une actualisation votée en juillet 2016 de la loi EEG, pour une entrée en vigueur début 2017⁴⁶, vise à une meilleure intégration des énergies renouvelables au marché : le « soutien aux énergies renouvelables est prédéfini par la loi à un système concurrentiel où la rémunération accordée sera définie à l'issue d'appels d'offres" ». « Cette réforme est principalement guidée par le souci du gouvernement allemand de: assurer un développement des EnR rentable en termes de coûts; synchroniser le développement des EnR et le développement du réseau électrique; respecter les trajectoires établies pour le développement des différentes technologies renouvelables et mettre en place un cadre visant à préserver la diversité des acteurs. ».

Les technologies concernées dès 2017 sont l'éolien terrestre (appels d'offre relevés à 2 800 MW annuels sur 2017-2019 et 2 900 MW à partir de 2020) et en mer (700 à 900 MW annuels à partir de 2021 avec un objectif 2030 cumulé de 30 GW), le photovoltaïque (600 MWc annuels avec annulation du plafond cumulé de 52 GWc introduit par l'EEG 2014) et la biomasse (150 MW annuels sur 2017-2019 et 200 MW annuels au-delà). La réforme ne concerne que les installations de puissance supérieure à 750 kW (150 kW pour la biomasse).

Cette actualisation de 2016, présentée comme un tournant de la transition énergétique allemande (*Energiewende*), met aussi l'accent sur la numérisation, c'est-à-dire le développement de réseaux, capteurs et logements intelligents.

On peut noter aussi, pour la première fois, le concept d'appels à projets « technologiquement neutres », qui ne ciblent pas une énergie renouvelable spécifique : appels pour éolien et solaire, voire appels pour « technologies innovantes ». Les appels éoliens seront plus contraints dans les zones où le système électrique est fortement sollicité. Enfin les appels d'offre seront ouverts, à hauteur de 5 % de la capacité, à des installations dans d'autres pays d'Europe.

La figure ci-dessous résume les dix points de l' « agenda énergie » décidé 2014 et actualisé en 2016 pour la transition énergétique allemande.

⁴⁶ http://enr-ee.com/fr/systemes-marches/actualites/lecteur/memo-sur-les-points-cles-de-la-reforme-de-la-loi-allemande-sur-les-energies-renouvelables-la-loi-ee-2016.html?file=files/ofaenr/04-notes-de-synthese/02-acces-libre/04-systemes-et-marches/160608_memo_OFATE_reforme_loi_EEG_points_cles.pdf

	2014												2015												2016											
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
RES Act	RES Act 2.0			Pilot auction rules			Pilot auctions			Report on effects so far			Renewable Energy Sources Act 3.0 (auctions)			Start of auctions																				
EU 2030/ETS	EU 2030 targets			Development of 2030 governance			Negotiation of new EU legal framework			ETS reform (market stability reserve)												ETS reform post-2020														
Electricity market design	Expert opinions			Green Paper			White Paper			Electricity Market Act/ Capacity Reserve Ordinance			Implementation of legislation																							
Regional cooperation (in EU)/internal market	Strengthening of regional cooperation in the power sector												Discussion of EU electricity market design												Pilot PV auctions scheme											
Transmission grids	2015 Scenario Framework			2024 Grid Development Plan			Revision of Federal Requirements Plan Act			2030 Scenario framework																										
Distribution grids	Evaluation of Incentive Regulation Ordinance			Drafting of Act on the Digitisation of the Energy Transition			Revision of Incentive Regulation Ordinance			Act on the Digitisation of the Energy Transition																										
Efficiency strategy	Energy Efficiency Action Plan			Implementation of Energy Efficiency Action Plan incl. implementation of EED												Green Paper on energy efficiency																				
Buildings strategy	Drafting of Modernisation Roadmap			Key points of the Energy Efficiency Strategy for Buildings			Revision of Energy Conservation Act / Energy Conservation Ordinance and Renewable Energies Heat Act																													
Gas supply strategy	Development of a gas supply strategy												Implementation of strategy in coordination with international partners																							
Monitoring/platforms	Progress Report			2015 Monitoring Report			2016 Monitoring Report																													

Dispositif actuel de la transition énergétique allemande – Source, <http://bmwi.de/EN/Topics/Energy/Energy-Transition/overall-strategy.html>, juillet 2016

3.2.1.3. La maîtrise de l'énergie dans le bâtiment : l'ordonnance EnEV

L'ordonnance sur l'économie d'énergie (Energieeinsparverordnung, en abrégé EnEV) vise à réduire les pertes dans le secteur du bâtiment. Elle a été rénovée en 2013 avec entrée en vigueur début 2014. Les mesures les plus récentes sont l'obligation d'échange de vieux équipements de chauffage ainsi qu'un durcissement des exigences en matière d'utilisation en énergie primaire (baisse moyenne de 25%).

3.2.1.4. Programmes d'appui : l'initiative nationale pour la protection du climat NKI

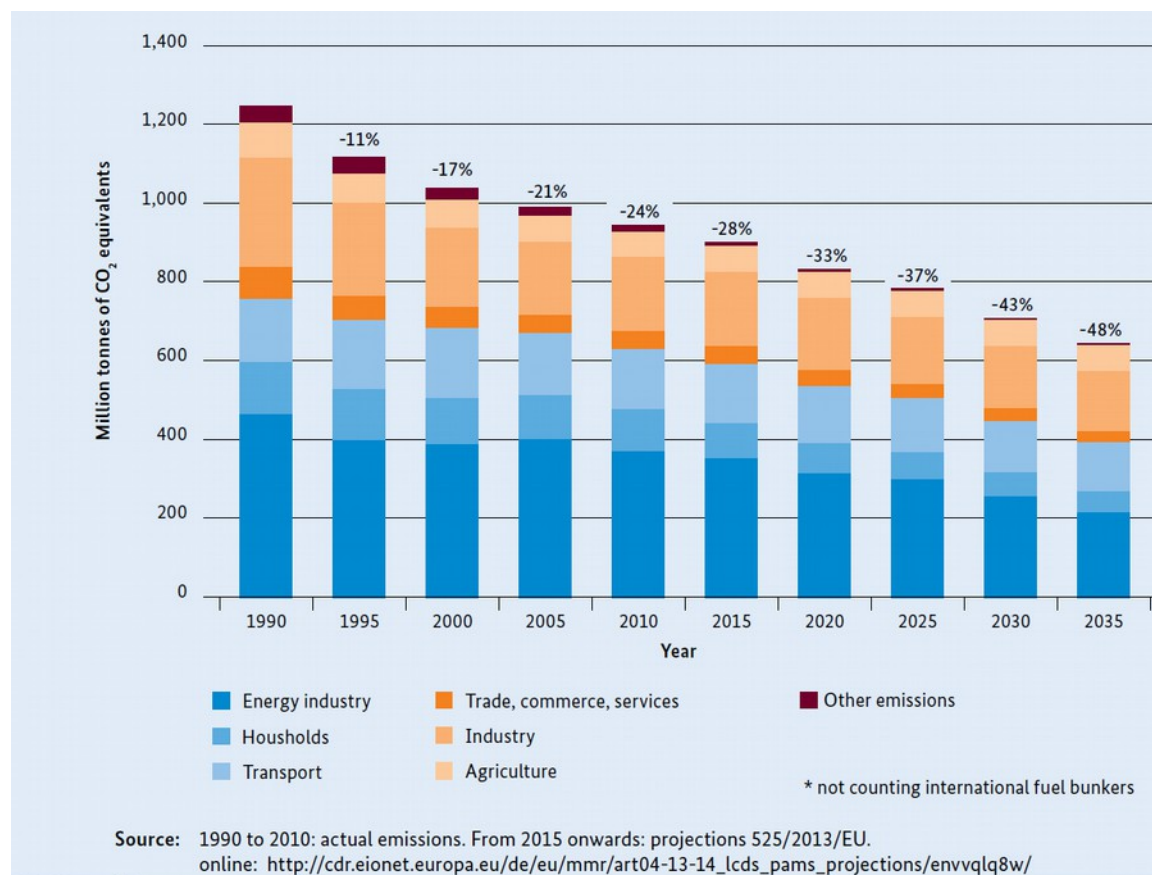
L'initiative nationale pour la protection du climat (*Nationale Klimaschutzinitiative*, en abrégé NKI) est un dispositif du ministère fédéral de l'environnement qui depuis 2008 initie et soutient des projets d'efficacité énergétique et de réduction des émissions. Il a permis de réduire les émissions de 1,4 MtCO₂eq entre 2008 et 2011. Les projets soutenus sont très divers : réseaux d'échanges, installations de conditionnement d'air efficaces, production combinée d'électricité et de chaleur, bus hybrides, etc.

3.2.2. Programme d'action « Klimaschutz 2020 » lancé fin 2014 afin d'assurer l'objectif compromis de 2020

Cependant les projections actuelles (2016) sont pessimistes en matière d'émissions : une réduction de seulement 33 % serait atteinte en 2020 par rapport à 1990⁴⁷, soit

⁴⁷ <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimapolitik-der-bundesregierung/>

quasiment un retour au niveau d'émissions de 2010. Selon ces projections, l'industrie, les transports et l'agriculture contribuent moins que les autres secteurs, notamment le secteur de l'énergie qui fait plus de la moitié de l'effort.



	2005	2012	2015	2020	2025	2030	2035
Million tonnes CO ₂ equivalents							
Energy industry	398.8	378.6	351.8	314.2	299.0	255.7	213.9
Industry	186.1	186.2	190.0	182.3	170.0	157.4	151.9
Transport	157.5	151.3	150.9	144.3	136.1	128.8	122.6
Households	112.0	94.6	88.0	77.2	67.8	60.7	54.8
Trade/commerce/service	45.7	43.9	44.1	40.2	35.9	31.8	27.7
Agriculture	66.6	64.4	64.9	65.8	65.9	66.0	66.0
Other	22.2	14.0	11.0	9.1	7.8	6.9	6.1
Total	989.0	933.0	900.8	833.2	782.6	707.3	642.9
compared with 2005	-	-5.7%	-8.9%	-15.7%	-20.9%	-28.5%	-35.0%
compared with 1990	-20.6%	-25.1%	-27.7%	-33.1%	-37.2%	-43.2%	-48.4%
compared with basisyear*	-20.9%	-25.3%	-27.9%	-33.3%	-37.4%	-43.4%	-48.5%
* The base year is 1990 for carbon dioxide, methane and nitrous oxide and 1995 for HFCs, PFCs and sulphur hexafluoride. The calculations of base year emissions take this into account							
Source: 1990 – 2010: actual emissions. From 2015 onwards: projections 525/2013/EU. online: http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/envvqlq8w/							

Émissions (passées et projetées) allemandes de gaz à effet de serre entre 2005 et 2035, déclinées par secteur - Source : Ministère fédéral en charge de l'environnement, climate action report 2015, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_eng_bf.pdf

Sector	Emissions in 1990 in million tonnes of CO ₂ equivalent	Emissions in 2013 in million tonnes of CO ₂ equivalent		Trend from 1990 to 2013 as a percentage	Emissions in 2014 in million tonnes of CO ₂ equivalent [estimate]		Trend from 1990 to 2014 as a percentage	"With measures" projection for 2020 (not including measures under the Action Programme)	"With measures" projection for 2020. Change from 1990
		Absolute	[%]		Absolute	[%]			
Energy industry	468	377	40%	-19%	355	39%	-24%	314	-33%
Industry	283	188	20%	-34%	187	21%	-34%	182	-36%
Transport	163	158	17%	-3%	164	18%	+1%	144	-12%
Households	131	104	11%	-21%	88	10%	-33%	77	-41%
Trade/commerce/service	78	42	4%	-46%	35	4%	-54%	40	-48%
Agriculture	88	71	7%	-20%	70	8%	-21%	66	-26%
Other	38	13	1%	-65%	13	1%	-67%	9	-76%
Total	1,250	952	100 %	-24%	912	100%	-27%	833	-33%

Source: German Projection Report 2015 and authors' own presentation

Tendances des émissions allemandes de gaz à effet de serre entre 1990 et 2013, extrapolées à 2020 - Source : Ministère fédéral en charge de l'environnement, climate action report 2015, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_eng_bf.pdf

Ainsi l'objectif global ne sera pas atteint et il s'en faudra de 5 à 8 %. De nouvelles mesures apparaissent donc nécessaires.

En conséquence le gouvernement allemand a adopté le 3 décembre 2014 le programme « action climat 2020 » (« Aktionprogramm Klimaschutz 2020 »⁴⁸), composé d'une centaine de mesures destinées à réduire les émissions d'une quantité supplémentaire comprise entre 62 et 78 MtCO₂éq, afin de permettre à l'Allemagne d'atteindre son objectif de 40 % de réduction d'émissions en 2020 par rapport à 1990. Le plan reprend des mesures déjà en cours de mise en œuvre, il part du principe qu'il existe un potentiel important d'améliorations dans tous les secteurs mais ne fixe cependant pas d'objectif spécifique de réduction d'émissions par secteur.

Dans le sillage de l'accord de Paris, est élaboré un nouveau plan *Klimaschutz 2050*, après consultations avec les Länder, les communes, les entreprises et le public (voir *infra*).

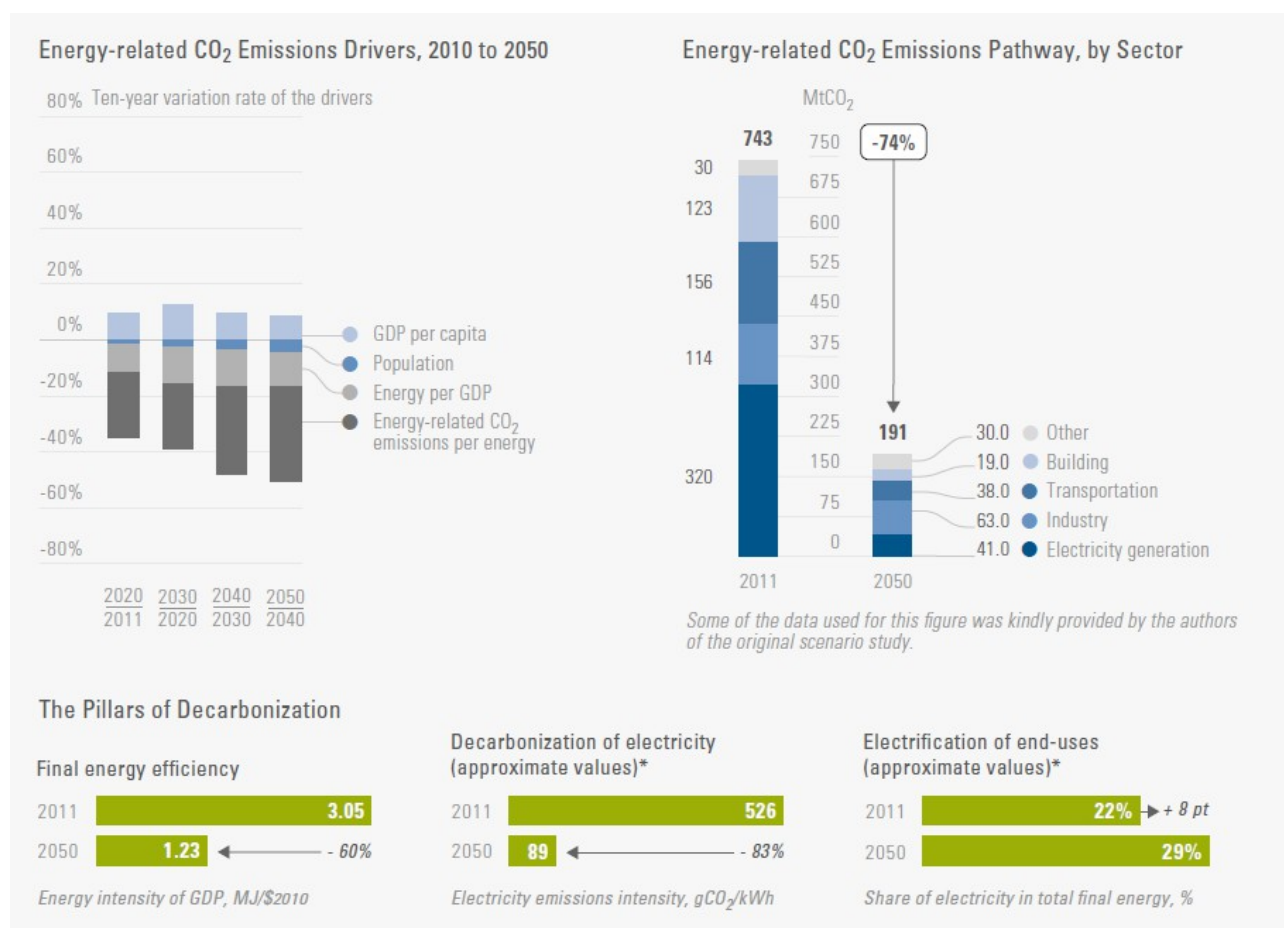
⁴⁸ http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_eng_bf.pdf

3.3. Le rapport DDPP sur l'Allemagne

Le rapport DDPP de 2015 sur l'Allemagne « pathways to deep decarbonization in Germany »⁴⁹ prend acte des progrès significatifs de l'Allemagne ces dernières années et de son atteinte des objectifs de Kyoto, avec des émissions de GES réduites de 27 % entre 1990 et 2014. Cependant les réductions d'émission se sont ralenties avec le temps. L'atteinte des objectifs de 2050 (réduction de 80 % à 95 % en 2050) suppose un taux de réduction annuel de 3,5 % des émissions, ce qui est l'ordre de grandeur du meilleur rythme de réduction jamais atteint en Allemagne.

Trois scénarios sont étudiés dans le rapport DDPP : un scénario des « objectifs gouvernementaux », appelé aussi « Target », un scénario d'« électrification renouvelable » appelé « 100-II » et un scénario -le plus ambitieux- de « réduction des émissions GES de 90 % » appelé « KS 90 ».

Le scénario des « objectifs gouvernementaux » est un scénario non officiel mais cohérent avec les objectifs affichés du gouvernement -objectifs encore non atteignables au vu des mesures prises.

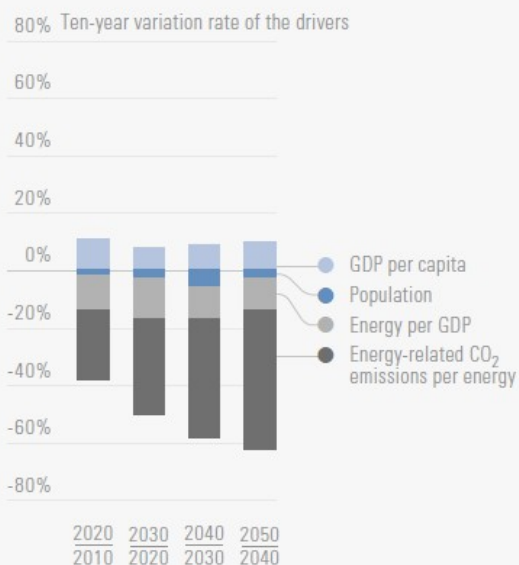


Scénario « objectifs gouvernementaux » - Source,
http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf

Le scénario « électrification renouvelable » est bâti sur des hypothèses de forte expansion des énergies renouvelables et d'efficacité.

⁴⁹ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf

Energy-related CO₂ Emissions Drivers, 2010 to 2050



The Pillars of Decarbonization

Final energy efficiency



Energy intensity of GDP, MJ/\$2010

Decarbonization of electricity



Electricity emissions intensity, gCO₂/kWh

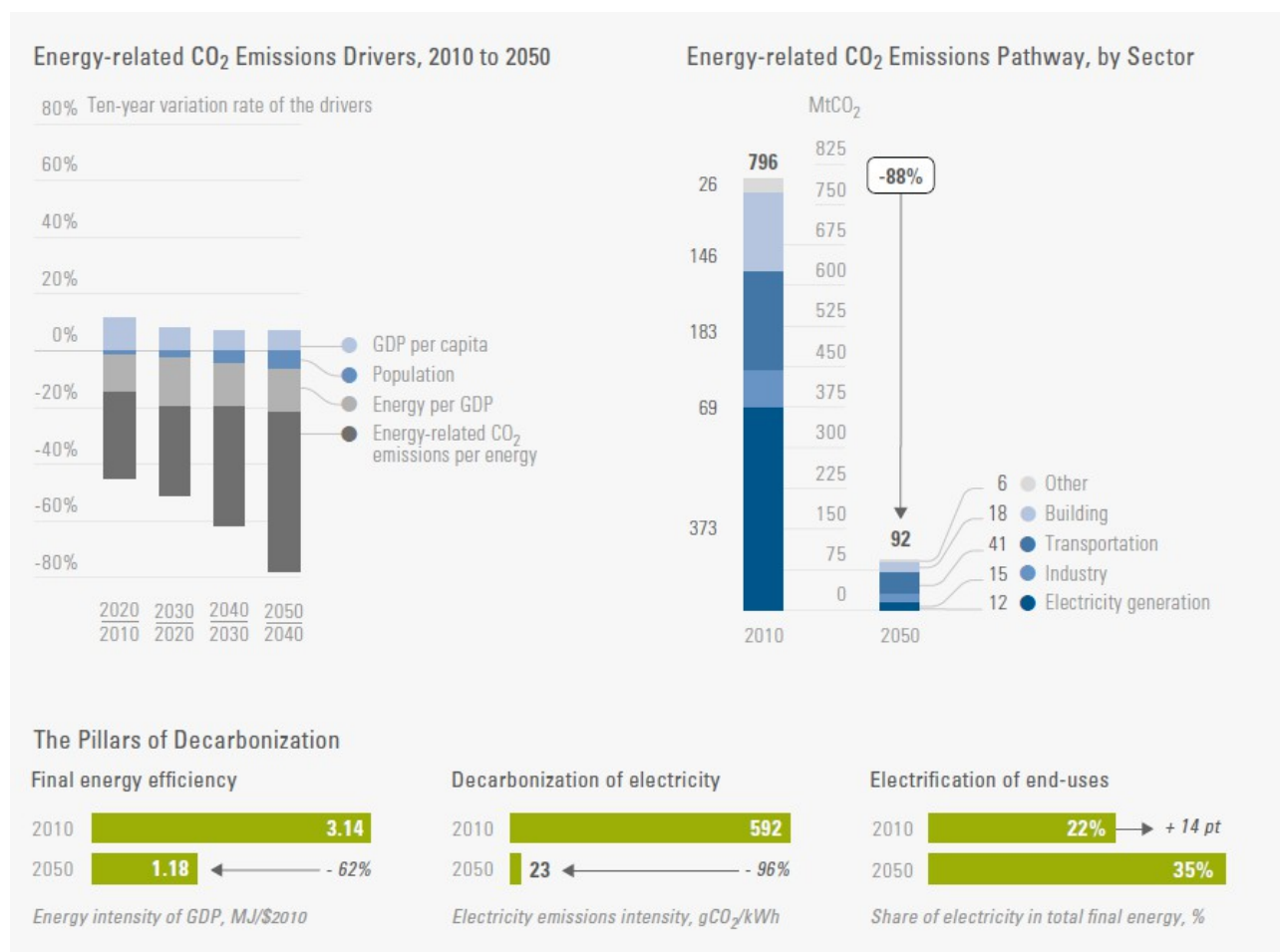
Electrification of end-uses



Share of electricity in total final energy, %

Scénario « électrification renouvelable » - Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf

Le scénario « réduction des émissions de GES de 90 % » est le plus ambitieux des trois scénarios, en termes de réduction d'émissions. Il est celui qui recourt le plus aux énergies renouvelables. Il est le seul à recourir à la CSC pour réduire les émissions industrielles et à compter sur des changements de comportement.



Scénario « réduction des émissions de GES de 90% » - Source,
http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf

Tous ces scénarios recourent à des améliorations de l'efficacité énergétique dans tous les secteurs et notamment dans le secteur du bâtiment, l'accroissement de l'utilisation des ressources renouvelables nationales (notamment pour la production d'électricité) et l'électrification (avec dans deux scénarios l'utilisation de combustibles synthétiques produits par électricité renouvelable, notamment pour les transports et l'industrie). Cela se traduit par une demande d'énergie finale réduite de 40 % à 47 % en 2050 par rapport à 2010. Les scénarios prennent tous en compte la disparition du nucléaire après 2020, et ne recourent pas aux technologies de CSC dans le secteur de la production d'électricité, en raison de la faible acceptation de telles technologies dans la société allemande.

Ces scénarios se différencient par le niveau envisagé de décarbonation du système énergétique. La demande d'électricité du scénario « objectifs gouvernementaux » est en 2050 de 100 TWh inférieure à celle de 2011, mais de 250 TWh inférieure pour le scénario « électrification renouvelable » et de 0 % dans le scénario « réduction des émissions de GES de 90% »).

Les trois scénarios se différencient aussi par la part du renouvelable dans le mix d'énergie primaire : de 11 % en 2014 on passe à 51 % dans le scénario « objectifs gouvernementaux », à 73 % dans le scénario « réduction des émissions de GES de 90 % ». L'hydrogène représente 4 % resp. 7 % de la demande finale d'énergie dans le scénario « réduction des émissions de GES de 90 % » (resp. « électrification

renouvelable ») tandis que l'électricité représente 37 % (resp. 35%) de cette demande finale.

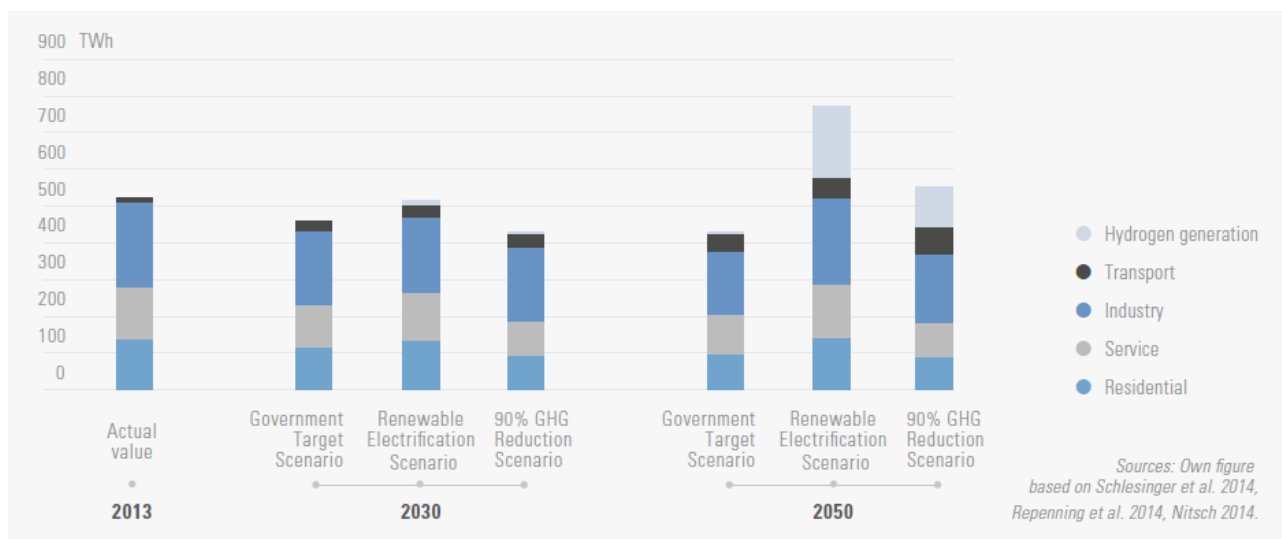
Parfois un scénario recourt à des stratégies plus controversées comme des réductions de demande finale d'énergie par changement de comportement (changement d'habitudes alimentaires et vestimentaires, report modal...), des importations nettes d'électricité renouvelable ou bioénergie, et le recours à la CSC pour réduire les émissions industrielles.

Les principales difficultés ne sont pas le développement des stratégies mais bien leur mise en œuvre. L'amélioration de l'efficacité énergétique suppose une forte augmentation du rythme des rénovations thermiques des bâtiments et le déploiement des technologies bas carbone dans les transports. Le recours accru aux sources d'énergie électriques renouvelables requiert le développement d'options de flexibilité pour assurer la stabilité du réseau, l'introduction d'un nouveau concept de marché de l'électricité pour garantir des conditions stables aux investisseurs et assurer l'acceptation par le public des projets d'infrastructure.

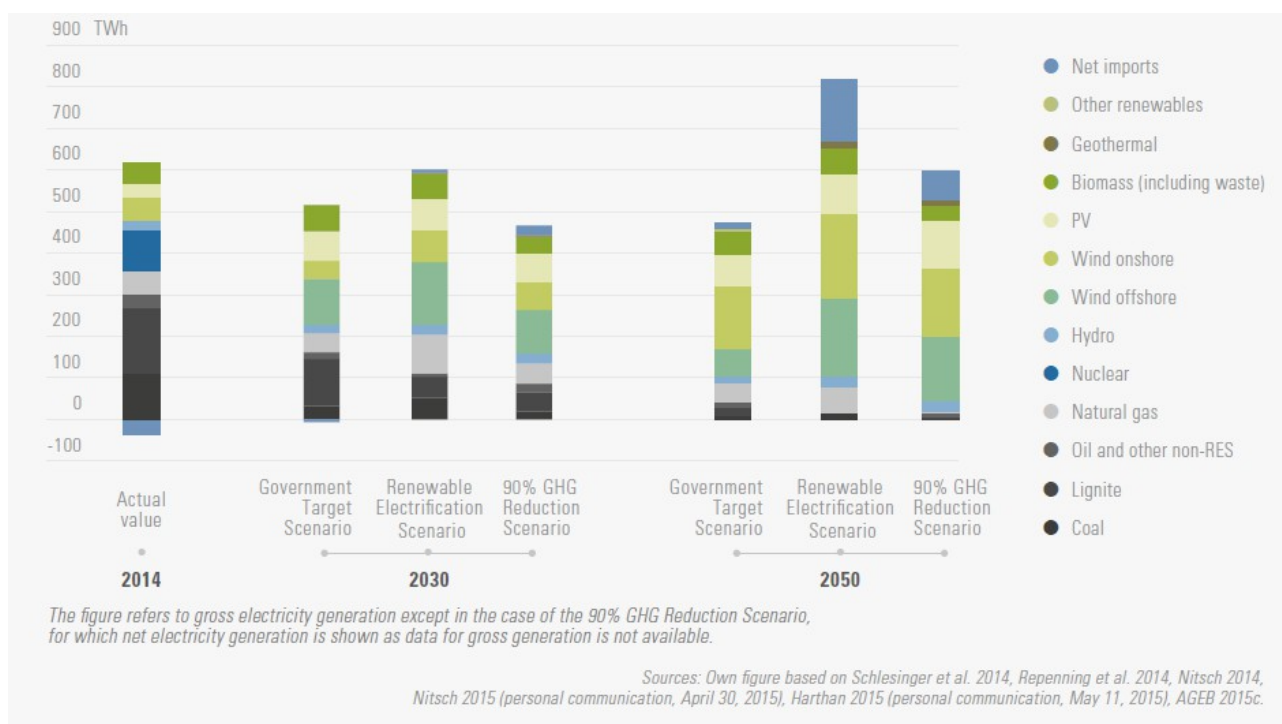
Pour finir des éléments descriptifs supplémentaires des scénarios étudiés sont comparés dans les figures ci-dessous.

	Government Target Scenario	Renewable Electrification Scenario	90% GHG Reduction Scenario
Energy demand reductions			
Final energy demand reductions through energy efficiency	Very strong efficiency improvements	Strong efficiency improvements	Very strong efficiency improvements
Final energy demand reductions through behavioral changes	Not considered	Not considered	Considered to a moderate extent
Using less CO₂-intensive energy sources/carriers			
Increased use of domestic renewable energy sources	Strong increase	Very strong increase	Strong increase
Substitution of fossil fuels through electricity	Moderate substitution	Strong substitution	Strong substitution
Use of renewable energy based synthetic fuels (e.g. H ₂) as a final energy carrier	Not used to a relevant extent	Strongly used	Moderately used
Importing carbon-free energy			
Net imports of electricity	Low net imports	Considerable net imports	Moderate net imports
Net imports of bioenergy	Moderate net imports	No net imports	Considerable net imports
Using CCS			
Use of CCS technology to reduce industrial GHG emissions	Not considered	Not considered	Considered

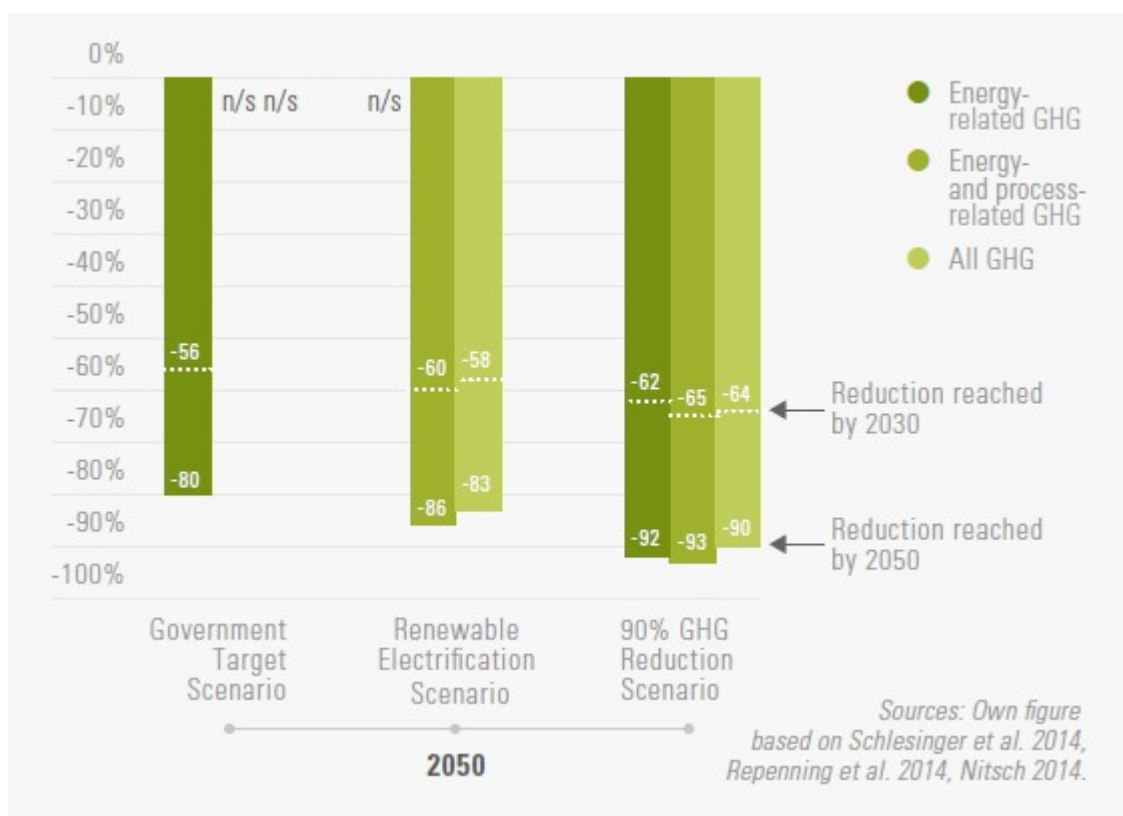
Rôles respectifs de diverses stratégies dans les trois scénarios considérés – source, Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf



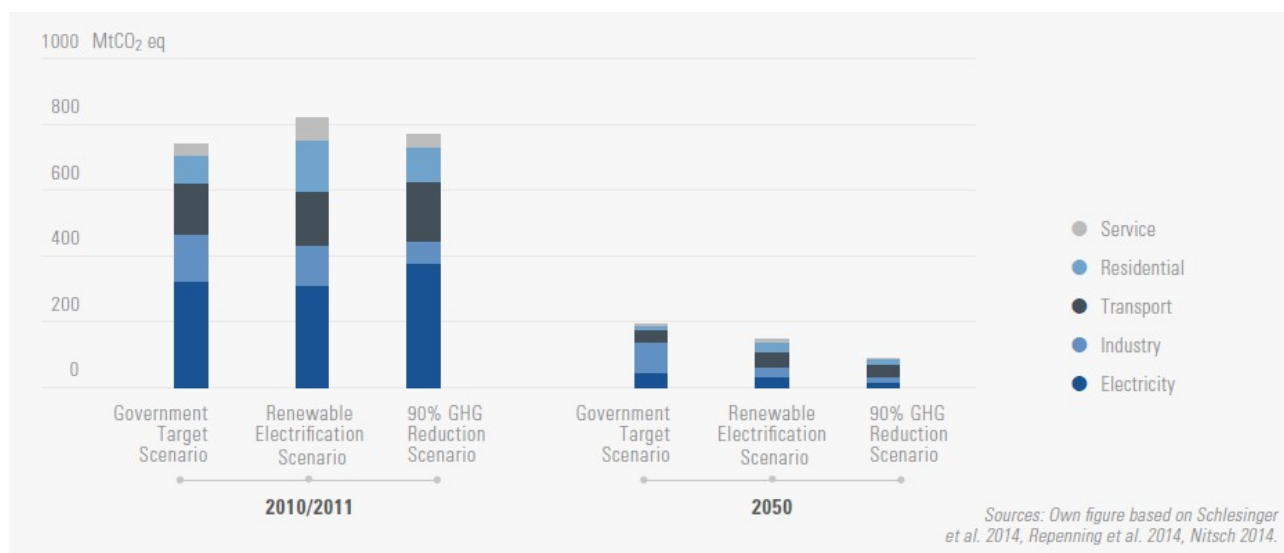
Demande d'électricité par secteur (y compris pour la génération d'hydrogène) dans les trois scénarios considérés – source, Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf



Production d'électricité par source (y compris pour la génération d'hydrogène) dans les trois scénarios considérés – source, Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf



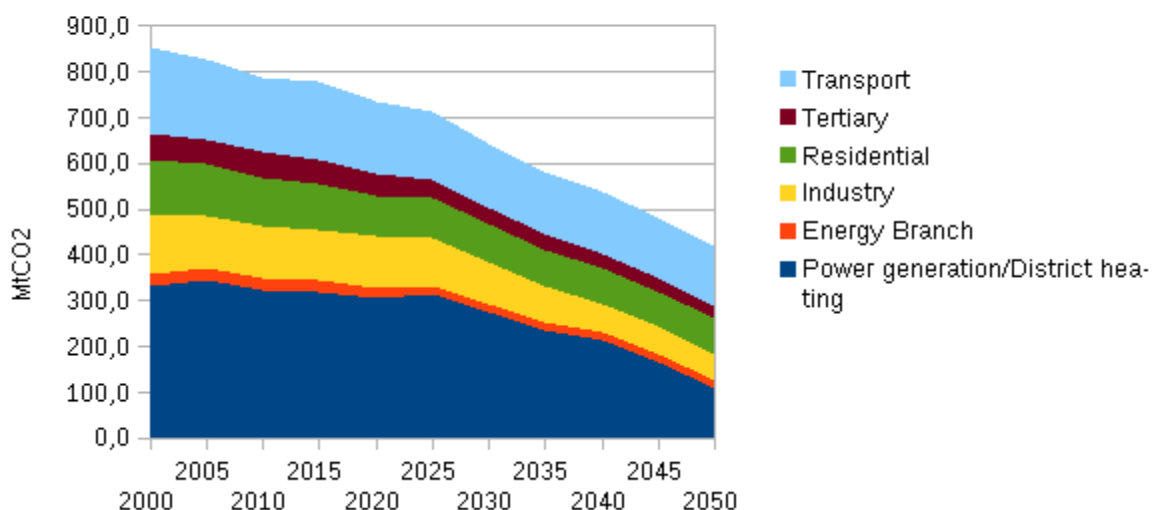
Réduction d'émissions en 2050 par rapport à 1990 dans les trois scénarios étudiés - Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf



Émissions par secteur en 2050 par rapport à 2010-2011 dans les trois scénarios étudiés - Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_DEU.pdf

GES en Allemagne - Source, mission sur la base de données issues de <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/AppendixRefSce.xls>

CO2 emissions (energy related)



Émissions de CO2 en Allemagne par secteurs – Source, mission sur la base de données issues de <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/AppendixRefSce.xls>

Ces projections -a priori pessimistes car n'incluant pas les politiques agréées pour 2030- confirment cependant l'insuffisance des mesures existantes.

3.4. Le plan d'action « Klimaschutz 2050 » en retrait

Le 6 septembre 2016 a été publié par le ministère allemand de l'environnement la version finale de son plan d'action climatique 2050 « Klimaschutz 2050 »⁵⁰, pour consultation avant d'être soumis au gouvernement allemand fin 2016 (mais a priori pas voté au Parlement). Ce document stratégique, révisable tous les cinq ans, donne des lignes directrices et fixe pour objectif (non rigide) à l'Allemagne une décarbonation dans une large mesure en 2050, avec notamment une transformation du secteur de production d'électricité « vers une fourniture d'électricité basée sur les énergies renouvelables jusqu'à environ 2050 », avec par exemple 2,5 GW de capacité photovoltaïque nouvelle chaque année, ainsi qu'une poursuite du développement de l'éolien. Un point d'étape est prévu en 2030 avec par exemple 120 TWh de cogénération en 2025-2030, ou 25 à 30 % d'énergie finale renouvelable dans le bâtiment.

Le plan stratégique « Klimaschutz 2050 » est cependant une version apparemment édulcorée par rapport aux versions antérieures, afin de faciliter les discussions au sein du gouvernement. Ainsi il n'y a pas de calendrier de sortie du charbon, et au lieu d'une sortie du charbon bien avant 2050 est évoquée une simple diminution de la production d'électricité à partir de charbon ; de fait les centrales modernes au charbon et au gaz se voient reconnaître une position de technologie de transition. ou d'un prix plancher pour le carbone en Europe). Par conséquent le secteur de l'énergie, au lieu d'une contribution « considérable » à la baisse des émissions, se voit demander une

⁵⁰ http://m.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_entwurf_bf.pdf

contribution « adéquate ». Il n'y a pas non plus d'objectif de réduction par secteur. L'effort sur les transports, initialement largement supérieur à celui sur les autres secteurs, devient simplement « ambitieux ».⁵¹

3.5. Conclusion

Les objectifs allemands de réduction d'émissions sont très ambitieux (-40 % en 2020 par rapport à 1990 ; -80 % à 95 % en 2050), notamment en raison d'un point de départ très carboné. Malgré les mesures prises et notamment le déploiement rapide et important des énergies renouvelables (notamment éolien et photovoltaïque) sur le territoire allemand, les tendances actuelles pointent vers une réduction de seulement 33 % en 2020. Des mesures additionnelles sont donc mises en œuvre au moyen du plan « Klimaschutz 2020 », élaboré en 2015. Le plan stratégique à plus long terme « Klimaschutz 2050 », dans sa présente version proposée par le ministère de l'environnement, vise à une décarbonation de l'économie dans une large mesure en 2050 mais avec une transition reposant largement sur les énergies fossiles.

En 2013, les émissions allemandes par habitant sont supérieures aux émissions britanniques dans tous les secteurs.

Pour les années à venir, l'Allemagne fait porter l'effort de réduction des émissions sur la production d'énergie, les bâtiments résidentiels et dans une moindre mesure les transports.

⁵¹ Source, Enerpresse n°11655, 13 septembre 2016

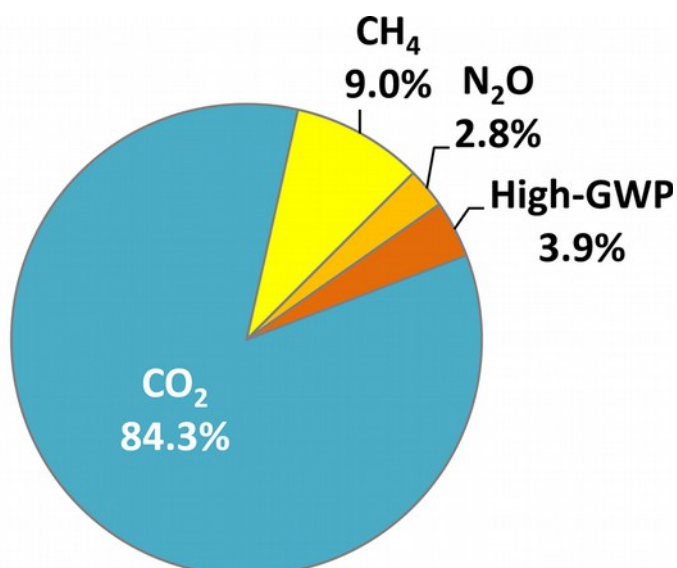
4. Californie

4.1. Des émissions stables

4.1.1. Des émissions par habitant élevées, mais de moitié inférieures à celles du reste du pays

En 2014 les émissions californiennes⁵² ont été de 441,5 MtCO₂éq, ce qui rapporté à la population (38 M habitants) représente 11,6 tCO₂éq par habitant. Cela est élevé selon les normes européennes mais inférieur de presque moitié à la moyenne américaine : les États-Unis ont émis en 2014 6870 MtCO₂éq⁵³, ce qui rapporté à leur population de 321 M d'habitants⁵⁴ représente 21,4 tCO₂éq/ht.

La ventilation de ces émissions par type de gaz (dioxyde de carbone CO₂, méthane CH₄, gaz hilarant N₂O, et autres gaz à haut pouvoir de réchauffement global (PRG, en anglais GWP) est la suivante :



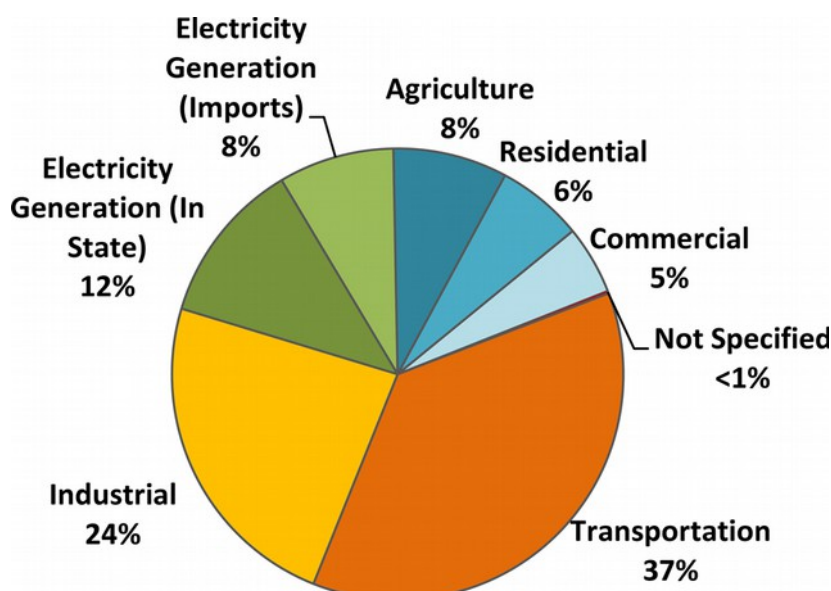
2014 Total CA Emissions: 441.5 MMTCO₂e

Émissions californiennes type de gaz – Source,
<http://www.arb.ca.gov/cc/inventory/data/data.htm>

⁵² <http://www.arb.ca.gov/cc/inventory/data/data.htm>

⁵³ <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-us-greenhouse-gas-emissions>

⁵⁴ <http://www.census.gov/quickfacts/table/PST045215/00>

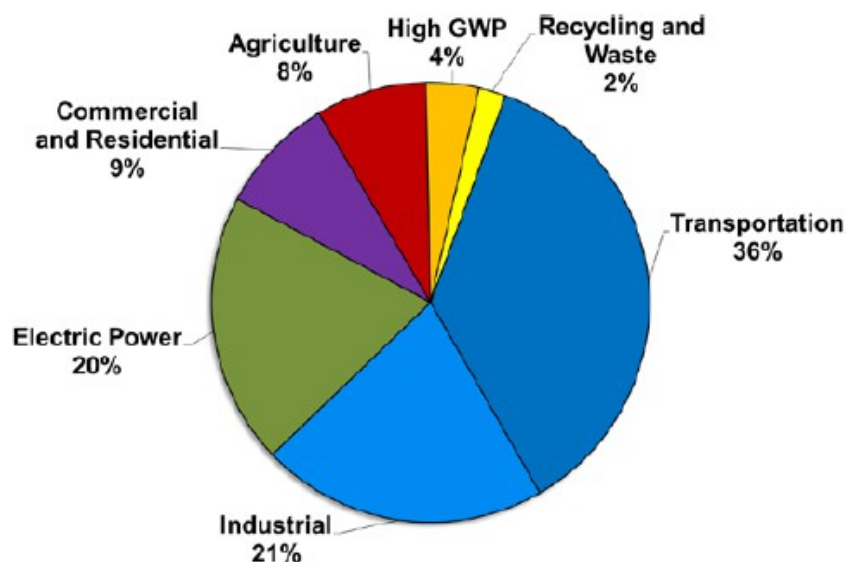


2014 Total CA Emissions: 441.5 MMTCO₂e

Émissions californiennes par secteur – Source,
<http://www.arb.ca.gov/cc/inventory/data/data.htm>

4.1.2. Des émissions sectorielles dominées par les transports, l'industrie et la production d'énergie

Les parts sectorielles des émissions de GES sont les suivantes :



Émissions californiennes par secteur – Source, 2000-2014 emissions trends report

http://www.arb.ca.gov/cc/inventory/pubs/reports/2000_2014/ghg_inventory_trends_00-14_20160617.pdf

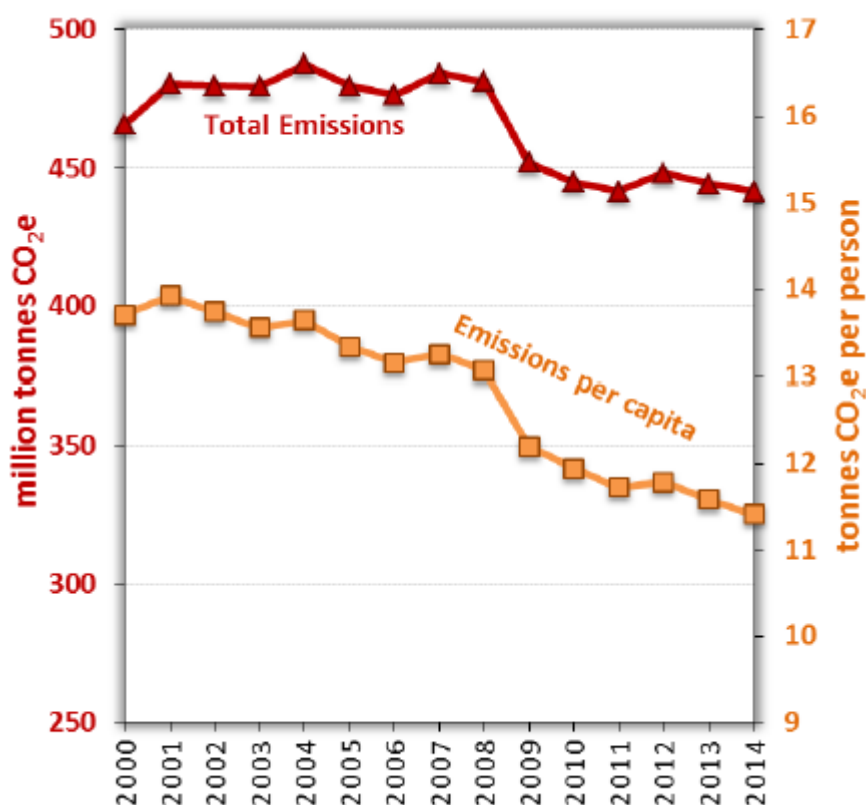
Un Californien émet donc ses 11,6 t CO₂ (chiffre comparable à celui de l'émission moyenne d'un Allemand) avec la décomposition suivante :

- 2,3 t CO₂éq pour l'énergie (moyenne européenne 2013 = 2,6 t)
- 4,3 t pour les transports (moyenne européenne 2013 = 1,7 t) ;
- 2,8 t pour l'industrie (moyenne européenne 2013 = 1,7 t) ;
- 1,3 t pour le résidentiel / tertiaire (moyenne européenne 2013 = 1,0 t) ;
- 0,9 t pour l'agriculture (moyenne européenne 2013 = 1,0 t).

Une spécificité californienne (par rapport à l'Europe) est l'importance des émissions liées aux transports, liée à des parcours importants en voiture et des émissions unitaires importantes par km parcouru.

4.1.3. Des émissions stables depuis 1990 et en décroissance depuis 2008

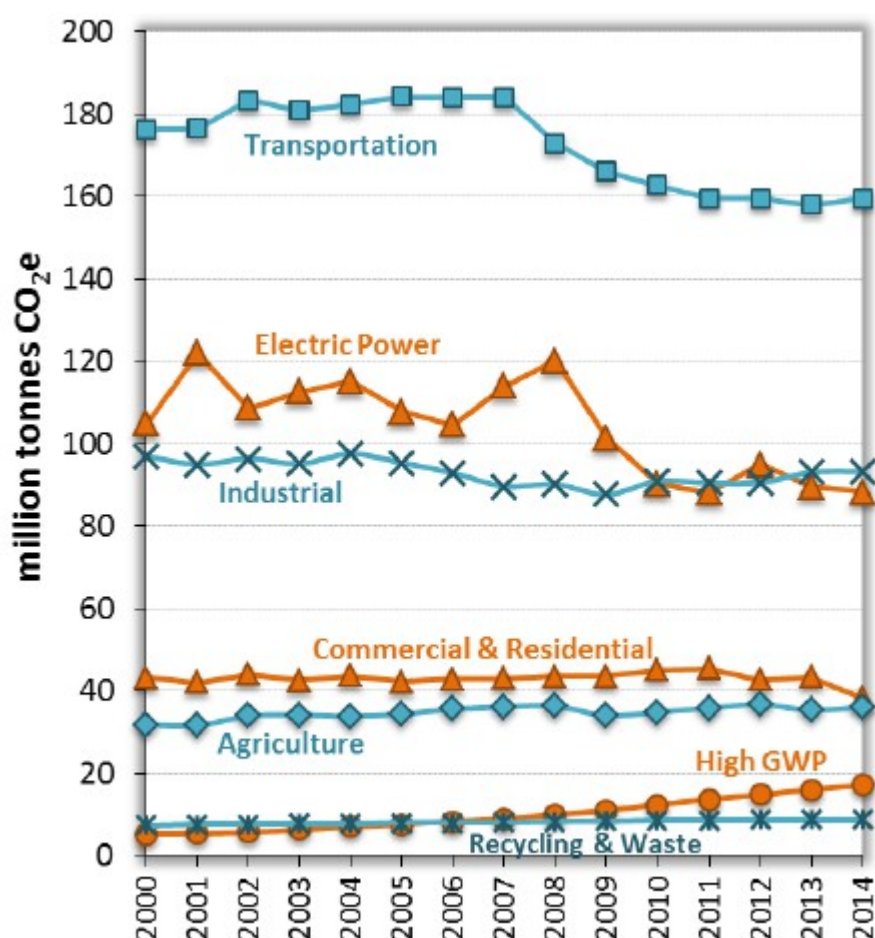
Les évolutions récentes indiquent une décroissance d'abord rapide puis lente après la crise financière de 2008.



Émissions californiennes de GES globales et par habitant – source, 2000-2014 emissions trends report

http://www.arb.ca.gov/cc/inventory/pubs/reports/2000_2014/ghg_inventory_trends_00-14_20160617.pdf

La décroissance qui a suivi l'année de crise 2008 est essentiellement due au secteur de l'énergie puis à celui des transports.



Émissions californiennes de GES par secteur – source, 2000-2014 emissions trends report

http://www.arb.ca.gov/cc/inventory/pubs/reports/2000_2014/ghg_inventory_trends_00-14_20160617.pdf

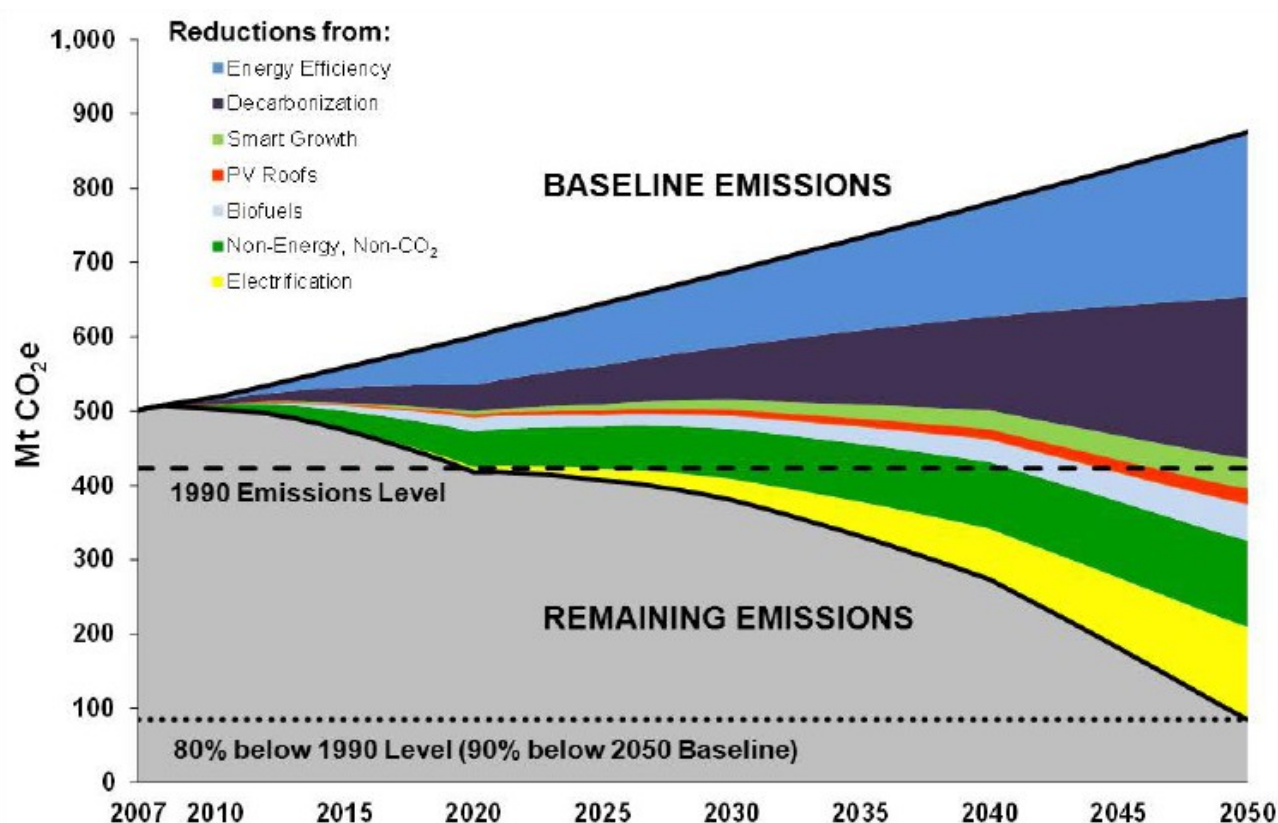
4.2. Des objectifs de réduction modérés pour 2020 mais identiques à ceux de l'UE pour 2030 avec un objectif de facteur 5 pour 2050

4.2.1. La loi de 2006 vise à ramener les émissions de 2020 au niveau de 1990

En juin 2005 le gouverneur de l'État Arnold Schwarzenegger a signé une ordonnance (« executive order ») fixant des objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre à court et long terme, à savoir : revenir en 2020 aux niveaux de 1990, et réduire en 2050 de 80 % par rapport à 1990 (et donc par rapport à 2020). La loi californienne « Global warming solutions act » de 2006 (dit aussi « assembly bill n°32 ou AB32 ») a intégré l'objectif de 2020 et donc requiert que la Californie ramène en 2020 ses émissions au niveau de 1990 (soit 433 MtCO₂eq, contre 444 MtCO₂eq en 2014 ; cela revient à des émissions en retrait de 15 % par rapport au tendanciel).

Pour cela elle a dû développer un plan de cadrage « *scoping plan* », actualisé tous les cinq ans, décrivant les approches nécessaires à l'atteinte de cet objectif. Le premier plan a été approuvé en 2008 et a été concomitant avec une nette baisse initiale des émissions (essentiellement dans les secteurs de l'énergie puis des transports) avant une lente décroissance ; sa première mise à jour a été approuvée le 22 mai 2014. En tout état de cause, l'objectif -modéré- de revenir en 2020 aux niveaux d'émission de 1990 est jugé très atteignable. Concrètement, il sera atteint si la réduction d'émissions observée en 2014 (2,8MtCO₂eq de moins 2013) est légèrement augmentée à 3 MtCO₂eq et maintenue jusqu'en 2020. Il faut noter que les chiffres de 2015 et 2016 seront affectés par l'importante fuite de 81 200 tonnes de méthane qui s'est produite d'octobre 2015 à février 2016 sur un site de stockage, ce qui représente (à 100 ans) 2,1MtCO₂eq soit 0,5 % des émissions annuelles californiennes.⁵⁵

À plus long terme les chemins envisagés en 2011 étaient par exemple les suivants :



Impact potentiel de mesures pour réduire les émissions californiennes – source, LBL 2011, <http://newscenter.lbl.gov/2011/11/24/ca-emissions-2050/>

La mesure prioritaire est l'efficacité énergétique (principalement dans le secteur du bâtiment), puis vient la décarbonation de l'électricité, puis la substitution du gaz par l'électricité elle-même décarbonée.

Les mesures prises effectivement dans le sillage de la loi de 2006 sont un marché du carbone et des mesures sectorielles pour les transports, l'électricité, le gaz, l'eau, le bâtiment, l'industrie, les forêts, le gaz à haut PRG, et l'agriculture .

Le marché du carbone, assorti de plafonds d'émissions (« *cap and trade* »), a été lancé le 1er janvier 2012, avec des obligations imposées aux gros émetteurs à partir du 1er

⁵⁵ Source : Enerpresse n°11644, 29 août 2016

janvier 2013, et un plafond d'émissions décroissant régulièrement. Le marché a été relié le 1er janvier 2014 avec celui du Québec, et étendu le 1er janvier 2015 aux transports et aux fournisseurs de gaz naturel. À titre d'illustration en 2015, le prix minimum de la tonne de (dioxyde de) carbone en Californie était de 12,1 US\$ (10,8€) avec un taux de croissance annuel égal au taux d'inflation plus 5 %. Le prix maximum de la tCO₂ a varié entre 45,2 et 56,51 US\$ (36,34€-45,43€) avec un taux de croissance annuel similaire. Par comparaison le prix plancher de la tCO₂ au Québec était en 2015 de 12, 06 CA\$ (7,8€) avec le même taux de croissance, et le prix maximum était compris entre 29 et 36€.⁵⁶

Le secteur des transports a fait l'objet de nombreuses mesures (voitures propres, normes d'émission, transports en commun, efficacité énergétique, électrification...) présentées dans le tableau *infra*.

⁵⁶ Non paper – a soft price collar for the European carbon market, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/0199_Non_paper_FR_soft_price_collar_EU_ETS.pdf

Transportation Measures		Status of Measure/Board Consideration Dates
T-1	Advanced Clean Cars	January 2012
T-2	Low Carbon Fuel Standard	April 2009 (early action item)
T-3	Regional Transportation-Related Greenhouse Gas Targets	Targets Approved September 2010. Seven regions, including the four major urban regions, have adopted Sustainable Communities Strategies (SCSs) that meet, and in some cases exceed, the targets.
T-4	Vehicle Efficiency Measures 1. Tire Pressure 2. Fuel Efficiency Tire Program 3. Low Friction Oil 4. Solar Reflective Automotive Paint and Window Glazing	March 2009 (early action items) Under consideration by United States Department of Transportation Part of Advanced Clean Cars program Part of Advanced Clean Cars program
T-5	Ship Electrification at Ports (Shore Power)	December 2007 (early action item)
T-6	Goods Movement Efficiency Measures 1. Port Drayage Trucks ----- 2. Transportation Refrigeration Units Cold Storage Prohibition 3. Cargo Handling Equipment, Anti-Idling, Hybrid, Electrification 4. Goods Movement Systemwide Efficiency Improvements 5. Commercial Harbor Craft Maintenance and Design Efficiency 6. Clean Ships 7. Vessel Speed Reduction	December 2007 (early action item) ----- Sub-measures 2–7 and others are being considered in the development of the 2014 Sustainable Freight Strategy
T-7	Heavy-Duty Vehicle GHG Emission Reduction • Tractor-Trailer GHG Regulation • Heavy Duty Greenhouse Gas Standards for New Vehicle and Engines (Phase I)	December 2008 (early action item) December 2013
T-8	Medium- and Heavy-Duty Vehicle Hybridization Voucher Incentive Project	April 2009 (early action item)
T-9	High-Speed Rail	Construction contract awarded August 2013

Statut 2014 des mesures relatives aux transports – source,
http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/2013_update/appendix_b.pdf

Il convient de noter que la mesure « high speed rail » implémentée comporte essentiellement des investissements de modernisation des réseaux ferrés existants.

Le secteur de l'électricité et du gaz a fait l'objet des mesures suivantes :

Electricity and Natural Gas Measures		Status of Measure
E-1	1. Building Energy Efficiency – Electricity	2013 Building standards adopted and begin implementation July 1, 2014.
	2. Appliance Energy Efficiency Standards – Electricity	CEC adopted and implemented standards for many types of appliances. Most recently for battery chargers and television sets. New standards for other appliances are currently under development.
	3. Utility Energy Efficiency Programs – Electricity	Programs being implemented.
CR-1	1. Building Energy Efficiency – Natural Gas	2013 Building standards adopted and begin implementation July 1, 2014.
	2. Appliance Energy Efficiency – Natural Gas	New standards under development.
	3. Utility Energy Efficiency Programs – Natural Gas	Programs being implemented.
CR-2	Solar Water Heating (CSI Thermal Program)	Program being implemented. 1,800 projects to date.
E-2	Combined Heat and Power	AB1613, enacted in 2007, being implemented. CPUC adopted standard contracts for CHP systems and set targets for CHP procurement.
E-3	33 Percent Renewable Portfolio Standard	SBx1 2, enacted in 2011, being implemented by CPUC, CEC, and publicly-owned utilities.
E-4	Senate Bill 1 Million Solar Roofs (California Solar Initiative, New Solar Home Partnership, Public Utility Programs) and earlier solar programs.	More than 2,000 MW installed to date.

Statut 2014 des mesures relatives à l'électricité et au gaz – source, http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/2013_update/appendix_b.pdf

Les mesures relatives à l'eau sont les suivantes :

Water Measures		Status of Measure
W-1	Water Use Efficiency	State agency actions to reduce water usage.
W-2	Water Recycling	State Water Resources Control Board (SWRCB) is funding recycled water development projects.
W-3	Water System Energy Efficiency	CEC has adopted standards for water efficiency. CPUC has ordered IOUs to invest in energy and water efficiency.
W-4	Reuse Urban Runoff	SWRCB is funding numerous stormwater reuse projects.
W-5	Renewable Energy Production	DWR is contracting from renewable energy projects. CEC is researching biogas technologies.
W-6	Water Public Goods Charge	The program has been evaluated but is not being implemented at this time.

Statut 2014 des mesures relatives à l'eau – source,
http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/2013_update/appendix_b.pdf

Les mesures relatives aux bâtiments (« green buildings ») sont les suivantes :

Green Building Measures		Status of Measure
GB-1	1. State Green Building Initiative: Leading the Way with State Buildings (Greening New and Existing State Buildings)	Green Buildings Executive Order B-18-12, signed April 2012.
	2. Green Building Standards Code (Greening New Public Schools, Residential and Commercial Buildings)	California Building Standards Commission adopted the 2010 CALGreen Code. 2013 CALGreen Code became effective January 1, 2014.
	3. Beyond Code : Voluntary Programs at the Local Level (Greening New Public Schools, Residential and Commercial Buildings)	Over 100 local governments have adopted green building standards that are more stringent than State standards.
	4. Greening Existing Buildings (Greening Existing Homes and Commercial Buildings)	Over 500 buildings have been certified to LEED-EB: O&M green building rating system.

Statut 2014 des mesures relatives au bâtiment – source,
http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/2013_update/appendix_b.pdf

Les mesures relatives à l'industrie sont les suivantes :

Industry Measures		Status of Measure/Board Consideration Dates
I-1	Energy Efficiency and Co-Benefits Audits for Large Industrial Sources	July 2010
I-2	Oil and Gas Extraction GHG Emission Reduction	Expected 2014
I-3	GHG Emissions Reduction from Natural Gas Transmission and Distribution	Under evaluation
I-4	Refinery Flare Recovery Process Improvements	Equivalent measure implemented by local air districts
I-5	Work with the local air districts to evaluate amendments to their existing leak detection and repair rules for industrial facilities to include methane leaks.	Under evaluation in collaboration with local air districts

Statut 2014 des mesures relatives à l'industrie – source, http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/2013_update/appendix_b.pdf

Les mesures relatives au recyclage et aux déchets sont les suivantes :

Recycling and Waste Measures		Status of Measure/Board Consideration Date
RW-1	Landfill Methane Control Measure	June 2009 (early action item)

Recycling and Waste Measures		Status of Measure/ Board Consideration Date
RW-2	Increasing the Efficiency of Landfill Methane Capture	Ongoing
RW-3: Sub strategy 1	Mandatory Commercial Recycling	Adopted by CalRecycle January 2012
RW-3: Sub strategy 2	Increase Production and Markets for Compost and Other Organics	Ongoing
RW-3: Sub strategy 3	Anaerobic/Aerobic Digestion	Ongoing
RW-3: Sub strategy 4	Extended Producer Responsibility (EPR)	Ongoing
RW-3: Sub strategy 5	Environmentally Preferable Purchasing (EPP)	Ongoing

Statut 2014 des mesures relatives au recyclage et aux déchets – source, http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/2013_update/appendix_b.pdf

Les mesures relatives à la forêt visent à soutenir une forêt durable.

Les mesures relatives aux gaz à fort pouvoir de réchauffement global (PRG) comme SF6 ou les HFC et PFC, sont les suivantes :

High GWP Gases Measures		Status of Measure/Board Consideration Dates
H-1	Motor Vehicle Air-Conditioning Systems: Reduction of Refrigerant Emissions from Non-Professional Servicing	January 2009 (early action item)
H-2	SF ₆ Limits in Non-Utility and Non-Semiconductor Applications	February 2009 (early action item)
H-3	Reduction of Perfluorocarbons in Semiconductor Manufacturing	February 2009 (early action item)
H-4	Limit Use of Compounds with High Global Warming Potentials in Consumer Products	June 2008 (early action item)
H-5	1. Low Global Warming Potential Refrigerants for New Motor Vehicle Air-Conditioning Systems	Part of Advanced Clean Cars program
	2. Air Conditioner Refrigerant Leak Test During Vehicle Smog Check	Measure not feasible at this time
	3. Refrigerant Recovery from Decommissioned Refrigerated Shipping Containers	Measure not feasible at this time
	4. Enforcement of Federal Ban on Refrigerant Release During Servicing or Dismantling of Motor Vehicle Air-Conditioning Systems	Measure not feasible at this time

High GWP Gases Measures		Status of Measure/Board Consideration Dates
H-6	1. Stationary Equipment Refrigerant Management Program – Refrigerant Tracking/Reporting/Repair Program	December 2009 (early action item)
	2. Stationary Equipment Refrigerant Management Program – Specifications for Commercial and Industrial Refrigeration	Energy conservation measures and leak-tight design and installation standards for supermarket refrigeration added to Title 24 Building Code January 2014
	3. Foam Recovery and Destruction Program	Measure not feasible at this time
	4. SF ₆ Leak Reduction Gas Insulated Switchgear	February 2010
	5. Alternative Suppressants in Fire Protection Systems	Measure not feasible at this time
	6. Residential Refrigeration Early Retirement Program	Measure not feasible at this time
H-7	Mitigation Fee on High-GWP Gases	Under evaluation

Statut 2014 des mesures relatives aux gaz à fort pouvoir de réchauffement global – source, http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/2013_update/appendix_b.pdf

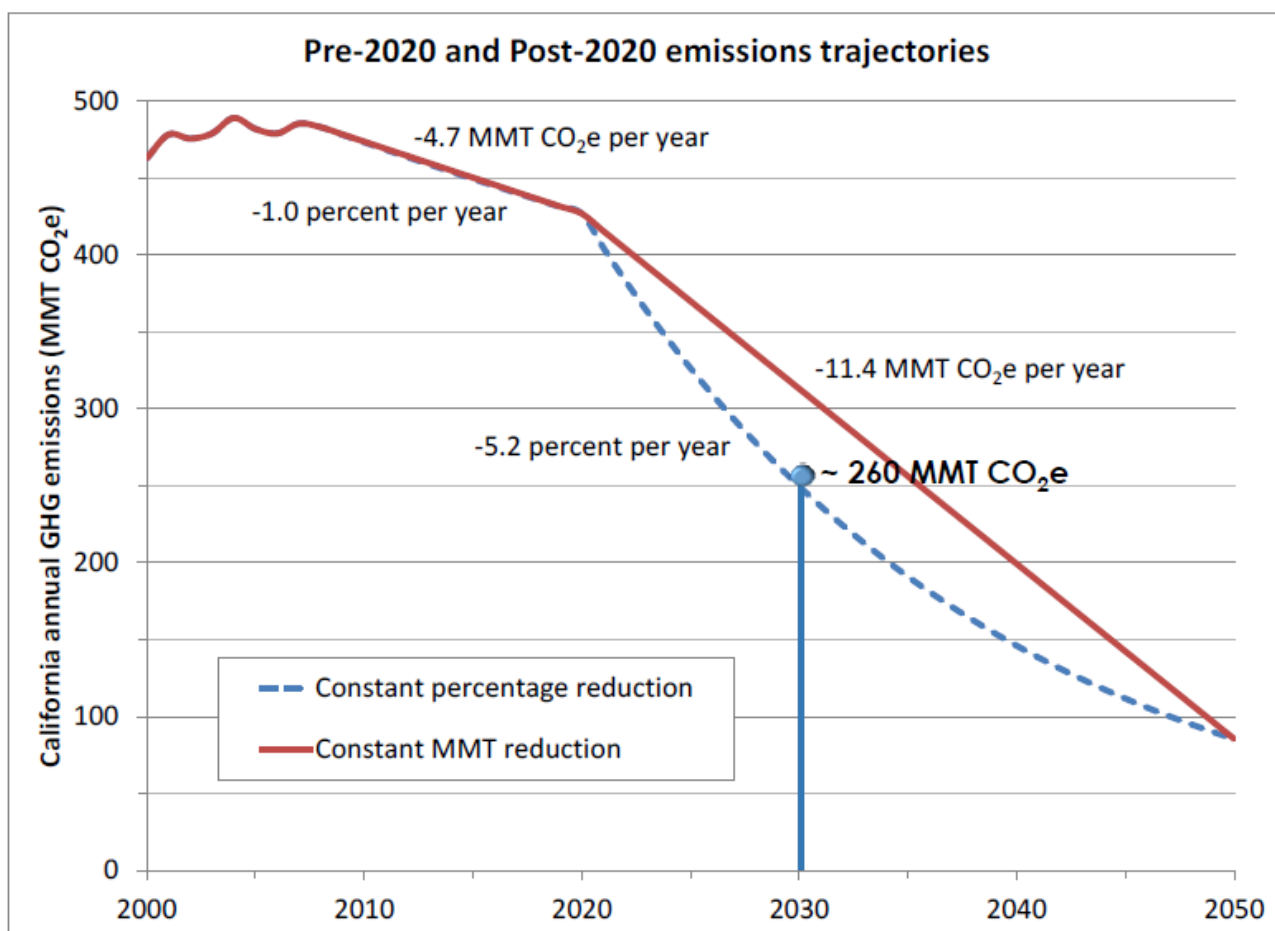
Les mesures liées à l'agriculture concernent la capture de méthane dans les laiteries de grande taille.

4.2.2. Une ambition récente aligne la Californie sur les objectifs de réduction européens

Le 29 avril 2015 le gouverneur de l'État Edmund « Jerry » Brown a émis une ordonnance (*Executive order B-30-15*) mentionnant les objectifs de 2020 et 2050, et établissant un objectif intermédiaire d'émissions de GES pour 2030, 40 % en dessous du niveau de 1990, soit le pourcentage de réduction du paquet énergie climat européen 2030, décidé peu auparavant.

Cet objectif a été voté le 26 août 2016 par le sénat californien. Il requiert des efforts supplémentaires par rapport au rythme de décroissance des émissions observé entre 2004 et 2014 : -9 % d'émissions environ, alors que 40 % de baisse sont attendus entre 2020 et 2030.⁵⁷

⁵⁷ Source : Enerpresse n°11644, 29 août 2016



Trajectoire des émissions californiennes jusqu'en 2050, en MtCO₂eq – Source, California scoping plan, http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/meetings/10_1_15slides/2015slides.pdf

La prochaine mise à jour du plan de cadrage (« *scoping plan* ») en fin 2016 ou début 2017 doit en principe prendre en compte cet objectif intermédiaire. Les premières orientations de ce plan sont déjà disponibles⁵⁸.

Parmi les objectifs emblématiques à atteindre en 2030 pour atteindre une diminution de 40 % des émissions, on trouve :

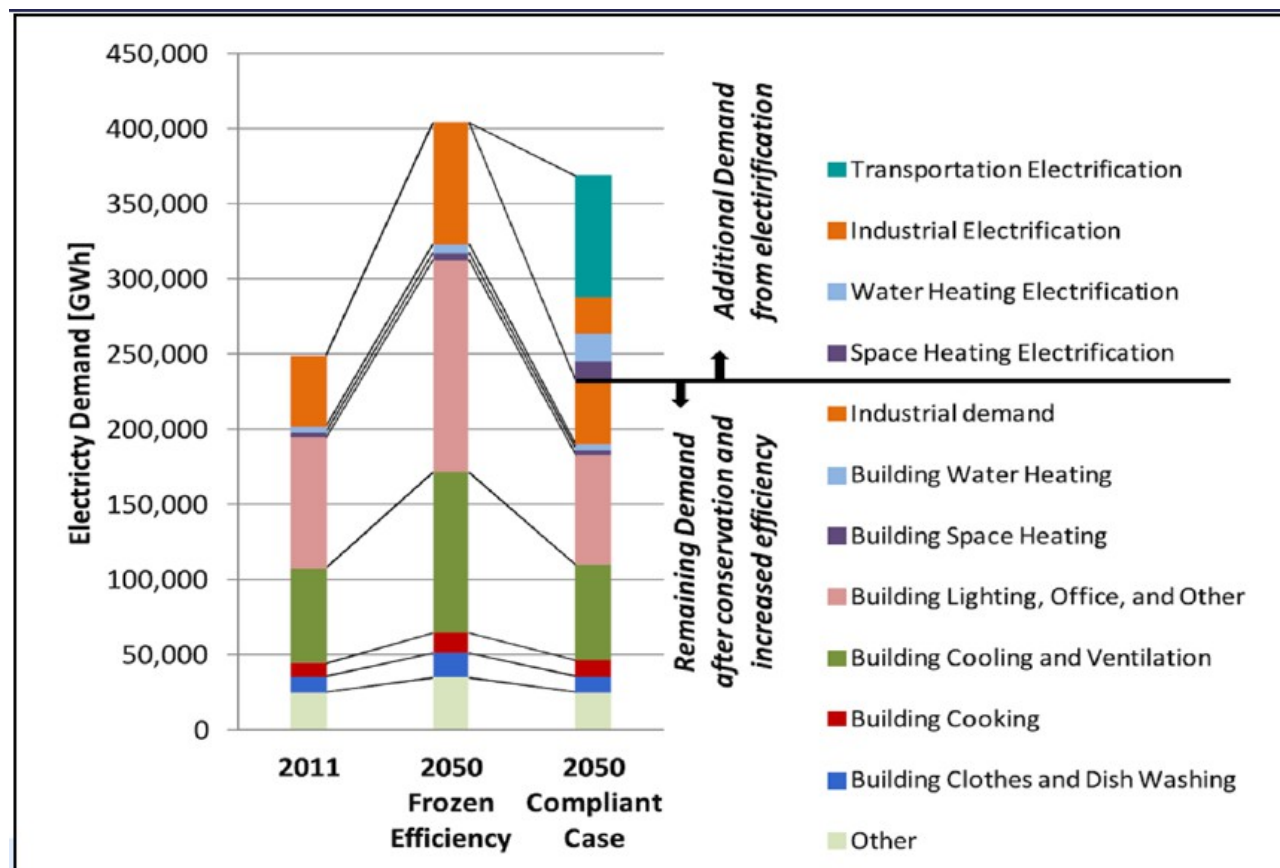
- 50 % d'EnR dans la production d'électricité ;
- 50 % de réduction dans la consommation de pétrole dans les transports (technologie, électrification et hydrogène, transports en commun et modes doux, etc.) ;
- un doublement de l'efficacité énergétique des bâtiments existants (État exemplaire, normes, innovation, rénovation...) ;
- la séquestration de carbone dans les sols ;

⁵⁸ Voir http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/meetings/10_1_15slides/2015slides.pdf et <http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/timeline.htm>

- un programme pour diminuer les émissions de polluants dits à courte durée de vie (méthane, suie, gaz réfrigérants)

L'accent est mis sur la production d'énergie, les bâtiments verts, les transports, l'eau, les sols et l'agriculture, les déchets, les polluants à courte durée de vie, l'industrie (avec une révision du système de *cap and trade* pour modifier le système d'allocation et durcir les plafonds d'émission).

Il est considéré que l'efficacité énergétique est presque toujours l'approche la plus rentable en matière de réduction d'émissions, avec des impacts sur le secteur de production d'énergie électrique, moins sollicité, et des transports, dont les infrastructures requises pour le transport électrique deviennent moindres.



Demande en électricité en vue de l'atteinte des objectifs d'émissions

californiens en 2050 – Source, California scoping plan,

http://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/meetings/10_1_15slides/2015slides.pdf

Enfin on peut noter que la Californie est le leader des USA en termes de stockage de l'énergie. De manière générale « l'industrie est stimulée par les déclarations de la Maison Blanche avec l'annonce récente d'engagements publics et privés dont le résultat sera le déploiement de 1,3 GW de stockage et plus important, ce qui représente un milliard de dollars d'investissement dans le stockage »⁵⁹. La mise en place d'une nouvelle administration en janvier 2017 tempère ces espoirs.

⁵⁹ L'Express n°11655, 13 septembre 2016

4.3. Conclusion

La Californie est, du point de vue européen, un émetteur important, mais du point de vue américain un bon élève. Les objectifs californiens pour 2020 sont modiques (revenir aux niveaux de 1990) mais, depuis 2015, sont au niveau d'ambition européen ou au-delà (-40 % en 2030, -80 % en 2050). Clairement, les années à venir demanderont un effort considérable. Les voies pour y parvenir passent d'abord par l'efficacité énergétique, puis la décarbonation de l'électricité et enfin l'électrification.

La Californie a de manière originale entrepris de limiter les émissions de polluants à courte durée de vie. Cette initiative, qui a un bon rapport coût efficacité, pourrait être répliquée ailleurs.

L'importance des émissions liées au transport appelle des mesures ambitieuses, qu'il sera intéressant de suivre. La Californie s'intéresse en particulier aux émissions des PL, peu réglementées en Europe.

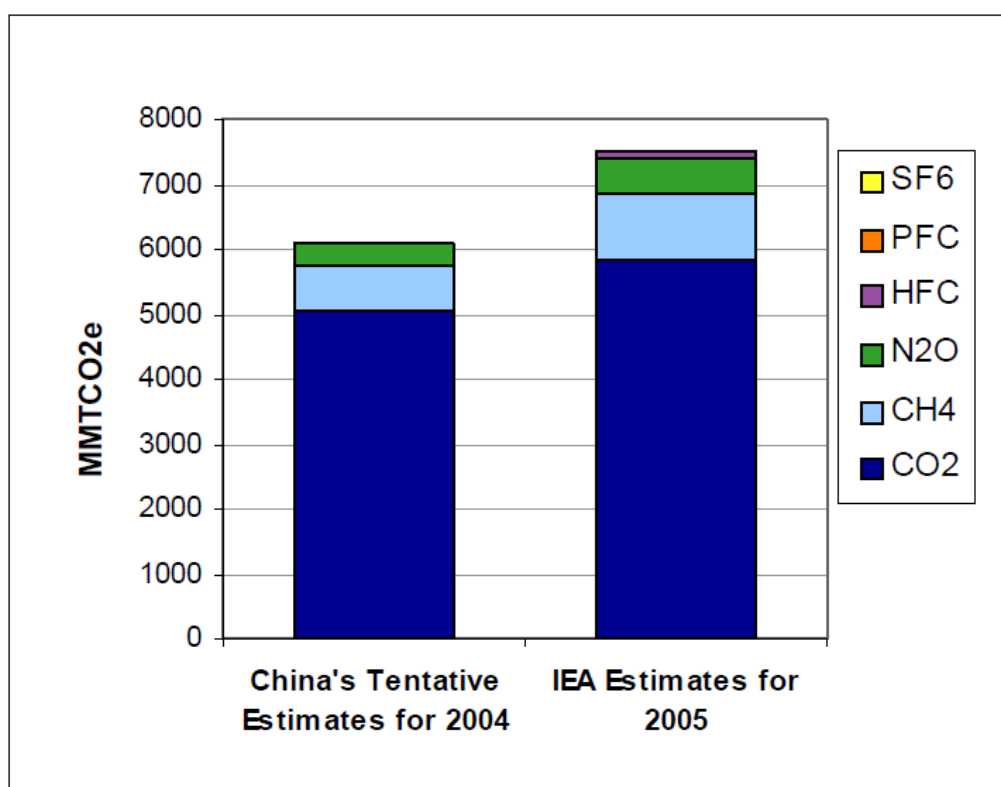
5. Chine

5.1. Des émissions incertaines mais en forte croissance

Les données d'émissions chinoises sont fragmentaires⁶⁰, les inventaires récents manquent, on peut au mieux en faire des estimations, elles-mêmes variables. En tout état de cause les émissions ont fortement augmenté depuis la croissance des années 1990 et l'accélération de cette croissance depuis 2000. Depuis 1990 les émissions chinoises ont au moins quadruplé.

Les données d'inventaire de la CCNUCC, pour les pays non membres de la dite « annexe 1 » (pays développés), dont la Chine, remontent à 2005 et fournissent des données de 1994⁶¹ : à l'époque les émissions chinoises étaient de 4 057,306 MtCO₂eq hors UTCF, et 3 649,827MtCO₂eq avec UTCF.

En 2004 et 2005 des estimations agrégées d'émissions ont été faites par la Chine et par l'AIE (agence internationale de l'énergie) avec les résultats suivants :



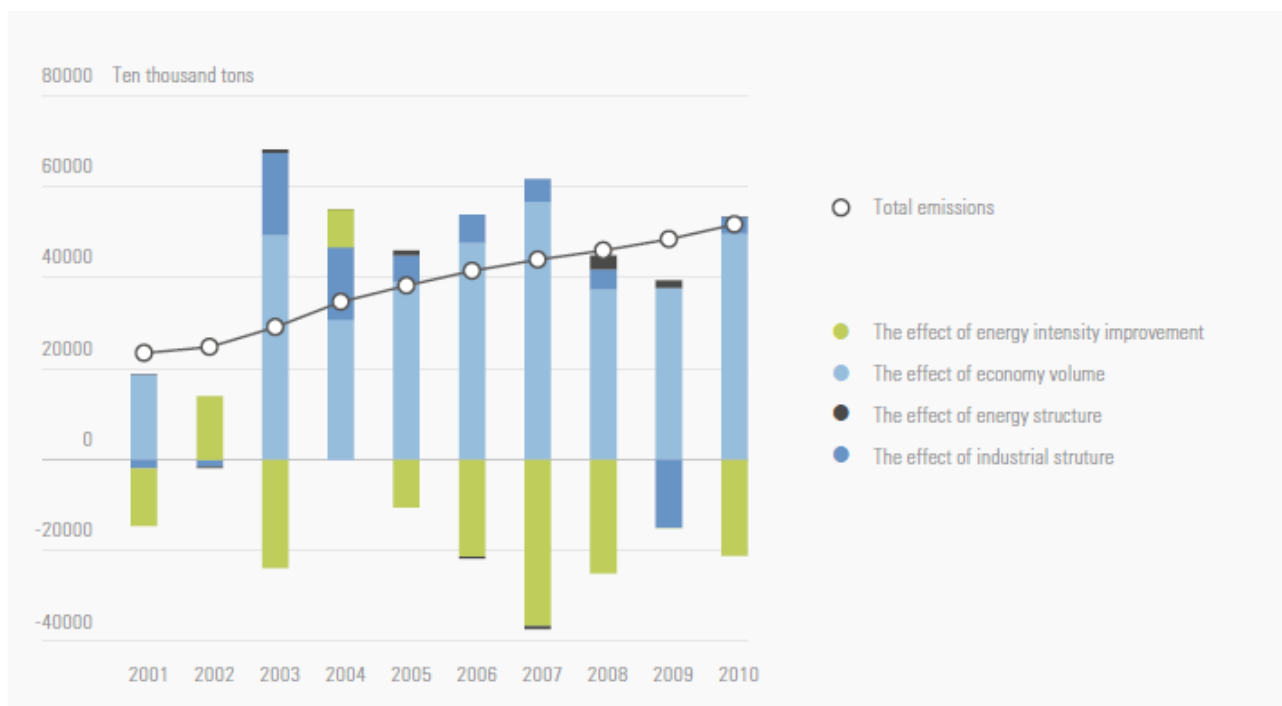
Source: CRS figure with estimates from IEA database (extracted January 8, 2008) and Xinhua (June 4, 2008).

⁶⁰ Sources <http://climateactiontracker.org/countries/china.html>, http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/25417/chinas_carbon_emissions_report_2015.html, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf>, <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/China/1/China%27s%20INDC%20-%20on%2030%20June%202015.pdf> et autres sources référencées plus bas

⁶¹ https://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_non_unfccc/items/3170.php

Comparaison des émissions de GES chinoises selon la Chine et l'AIE – Source, China's greenhouse gas emission and mitigation policy, Congressional research service (CRS), septembre 2008, <http://fas.org/sgp/crs/row/RL34659.pdf>

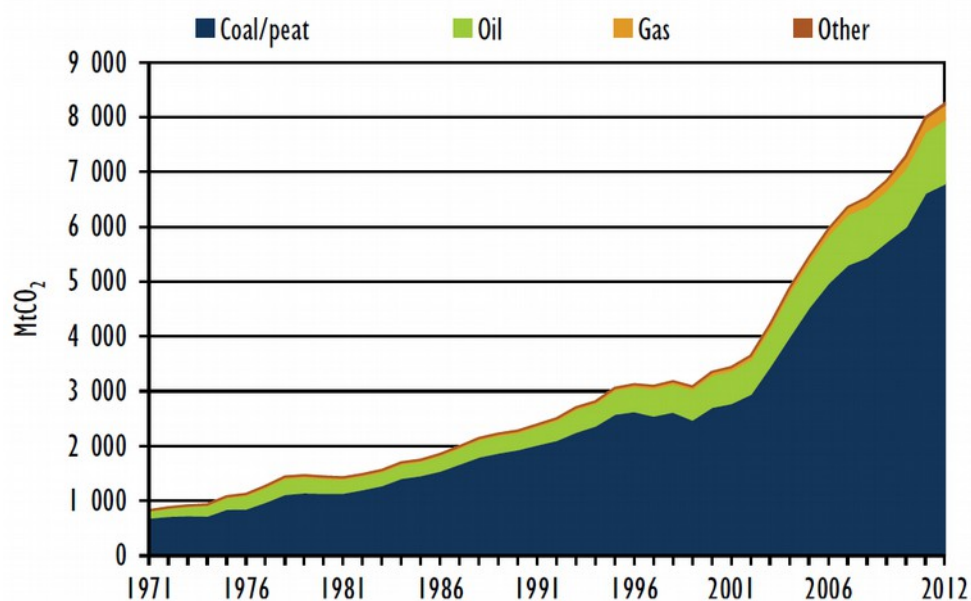
Des estimations des émissions de gaz à effet de serre pour 2010⁶² sont de 8162 MtCO₂éq. Ces émissions ont essentiellement crû à cause de la croissance économique, compensées dans une certaine mesure par l'amélioration de l'intensité énergétique.



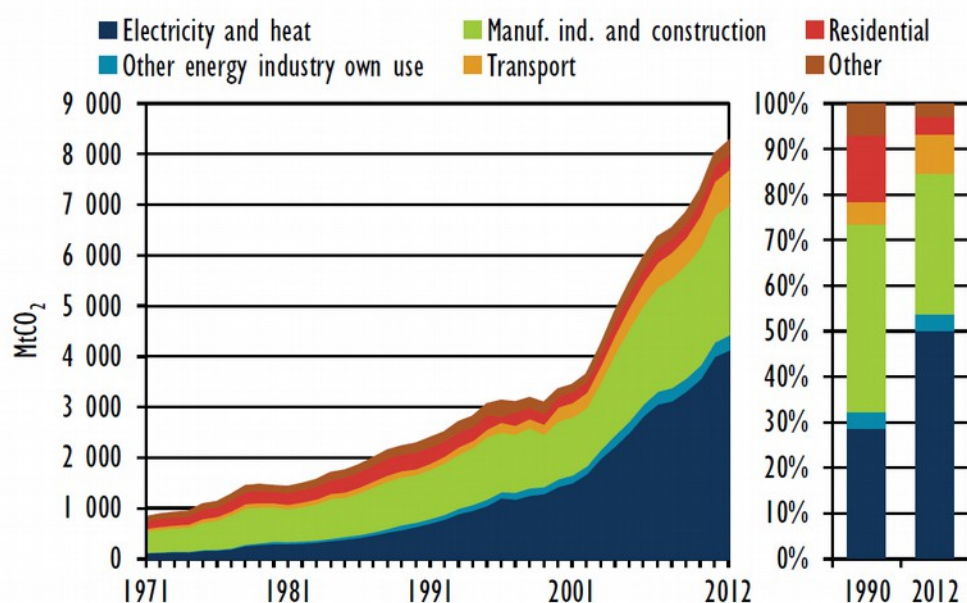
Décomposition des moteurs des émissions carbonées chinoises entre 2000 et 2010 – Source, « Pathways to deep decarbonization in China, 2015 report », http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf

Si l'on se limite aux émissions chinoises de CO₂ dues à la combustion, qui représentent l'essentiel des émissions de gaz à effet de serre chinoises, on constate la part prépondérante des émissions dues à la combustion du charbon. Les usages émetteurs sont essentiellement l'électricité, la chaleur et l'industrie (y compris le secteur de la construction).

⁶² http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf

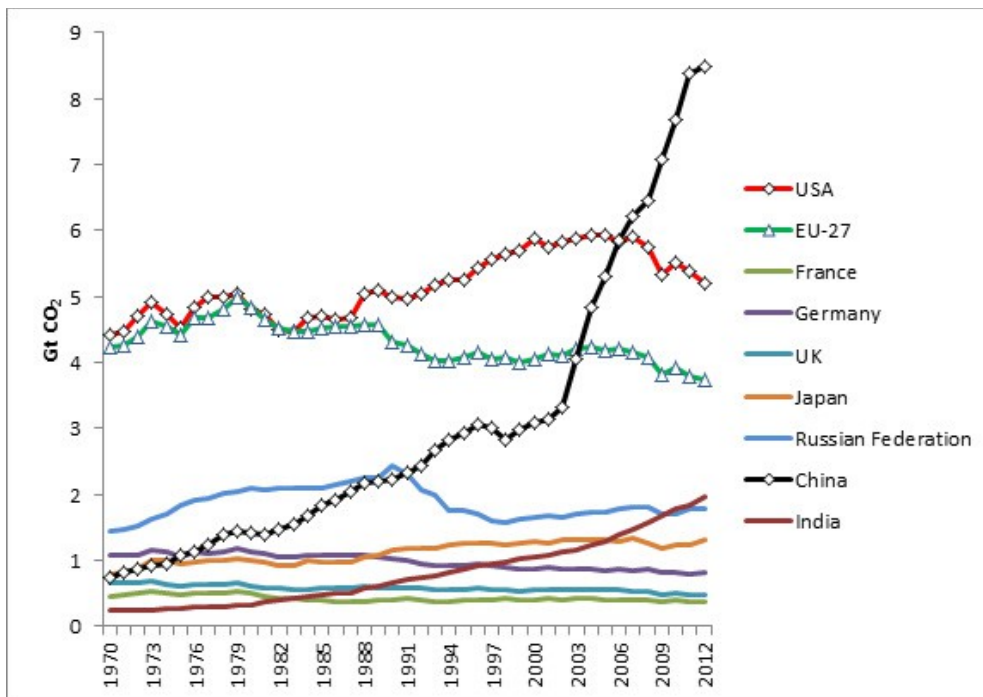


Émissions de CO₂ chinoises dues à la combustion, ventilées par combustible – source, « Energy, climate change, environment – 2014 insight », AIE, 2014, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EECC2014.pdf>



Émissions de CO₂ chinoises dues à la combustion, ventilées par combustible ou par secteur – source, « Energy, climate change, environment – 2014 insight », AIE, 2014, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EECC2014.pdf>

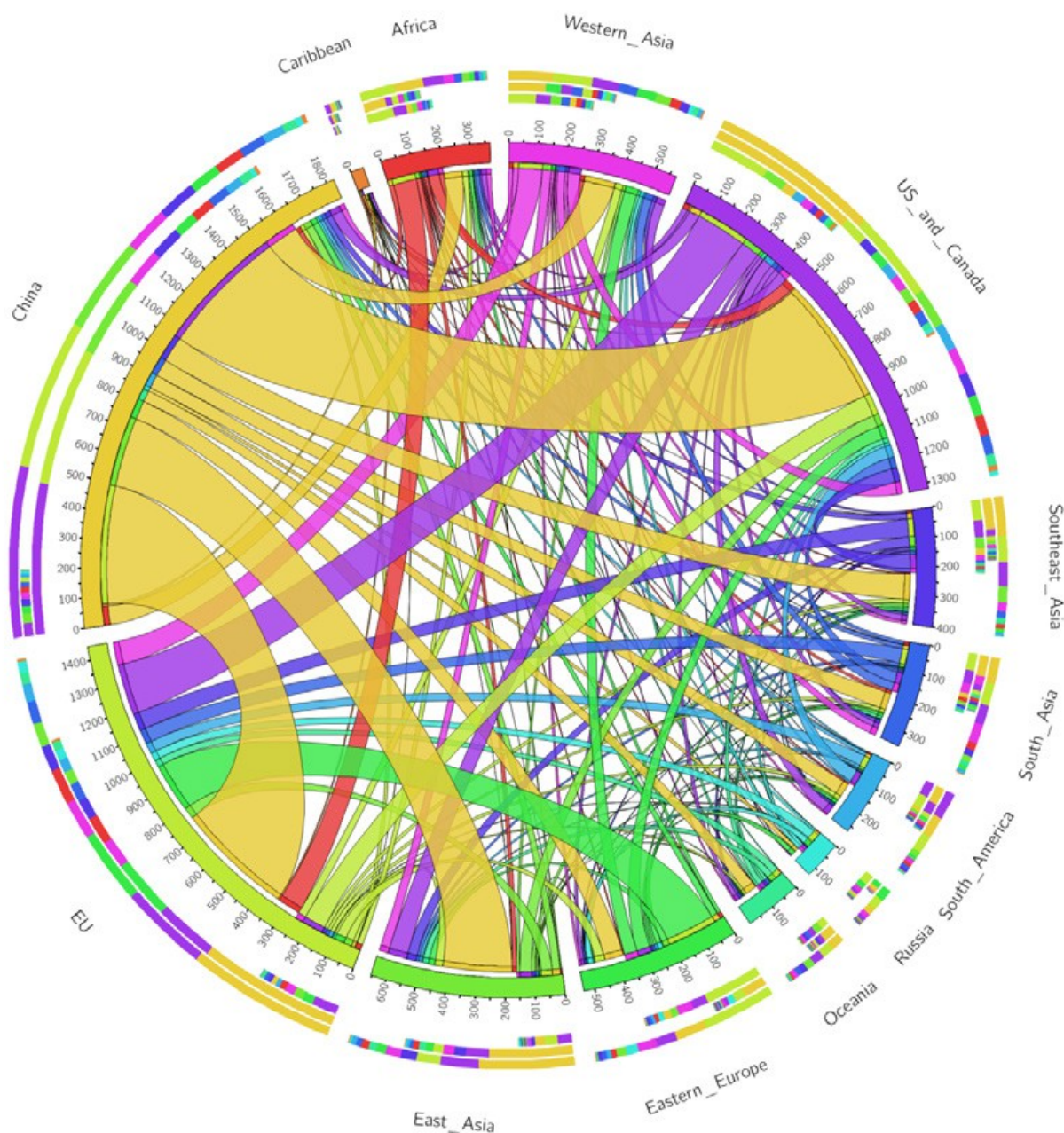
En fin de compte, la Chine est devenue en 2007 le premier émetteur de GES et de CO₂ au monde, dépassant en 2004 l'Union Européenne et en 2007 les États-Unis d'Amérique.



Émissions de CO₂ des plus gros émetteurs de 1970 à 2012 – Source,
<http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/carbon-emissions-report-2015-final.pdf>

Près des trois-quart des émissions sont liées au secteur de l'industrie. Il faut aussi noter que le quart des émissions chinoises ont pour origine une production consommée à l'étranger. La répartition de ces émissions exportées par zone géographique est présentée ci-dessous⁶³.

⁶³ <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/carbon-emissions-report-2015-final.pdf>



Émissions du commerce international ; le jaune représente les émissions des exportations chinoises – Source, <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/carbon-emissions-report-2015-final.pdf>

5.2. Des engagements significatifs, indexés sur la croissance, non contraignants

En 2009 la Chine a annoncé un engagement de réduire, à l'horizon 2020, ses émissions de CO₂ *par unité de PIB* (et non en valeur absolue) de 40 à 45 % par rapport à 2005. Elle a mis en œuvre à cet effet divers plans et programmes qui se sont, selon la Chine, traduits par des émissions de CO₂ par unité de PIB réduites de 33,8 % entre 2005 et 2014, une multiplication par 2,57 de la capacité hydraulique (300 GW en 2014), par 2,9 de la capacité nucléaire (19,88 GW en 2014), par 90 de la capacité éolienne raccordée (95,81 GW en 2014), par 400 sa capacité photovoltaïque

raccordée (28,05 GW en 2014), ainsi que des actions de reforestation (216 000 km² de plus par rapport à 2005)⁶⁴.

La Chine a aussi lancé des expériences pilote de marché carbone dans sept provinces, et doit lancer en 2017 un marché du carbone national intégré. Par exemple, en 2015 à Pékin (Beijing), le gouvernement peut acheter des autorisations d'émettre sur le marché si le prix moyen de la tCO₂ est pendant 10 jours en dessous de 20 yuans (2,7€). Et il peut vendre des autorisations d'émettre sur le marché si le prix moyen de la tCO₂ est pendant 10 jours au-dessus de 150 yuans (20,7€). À Canton (Guandong) par contre, le prix minimum de la tCO₂ est compris entre 25 et 40 yuans (3,27€ à 5,24€) plus 5 yuans de plus (0,65€) à chaque enchère trimestrielle.⁶⁵

Les engagements les plus récents sont les INDC⁶⁶ (non contraignantes) présentées par la Chine en vue de la COP21 de décembre 2015. Ces engagements ne concernent que le CO₂ et stipulent notamment un pic d'émissions de CO₂ au plus tard en 2030, et des émissions de CO₂ *par unité de PIB* (et non absolues) réduites de 60 à 65 % en 2030 par rapport à 2005.

La croissance économique reste une priorité de la Chine, et ses objectifs de réduction sont rapportés aux émissions par unité de PIB.

Les mesures envisagées sont énumérées dans l'INDC chinoise de 2015, pour mémoire, en matière de mitigation : la mise en œuvre de stratégies nationales dont notamment le programme national 2014-2020 sur le changement climatique et les programmes provinciaux, la formulation d'une stratégie à long terme et d'une feuille de route, le renforcement des stratégies locales (contrôle des émissions, du développement industriel, urbanisme), la construction d'un système énergétique « bas carbone » (avec entre autre le recours au nucléaire et aux énergies renouvelables, mais les centrales à charbon subsistent évidemment même si des efforts d'efficacité sont requis et si un objectif de 10 % de génération d'énergie primaire issue du gaz est stipulé pour 2020), la mise en œuvre du plan d'action 2012-2020 des industries face au changement climatique (efficacité énergétique, contrôle des émissions, normes...), un pic d'utilisation d'engrais et de pesticides en 2020, des mesures pour le bâtiment (50 % de bâtiments neufs « vers » en 2020) et les transports (transports décarbonés, 30 % de part des transports en commun dans les villes « moyennes » et « grandes »), des mesures pour l'UTCF (reforestation, zones humides...), éducation du public, recyclage, etc. ; et en matière d'adaptation, le renforcement de la résilience aux aléas liés au changement climatique : gestion de l'eau, gestion des crises, santé, etc. Des mesures transversales sont prévues pour aider au déploiement d'une société bas carbone : projets pilotes, R&D, marché du carbone (des expérimentations provinciales sont en cours et un marché unifié du carbone est prévu en 2017), comptabilité et inventaire des émissions, participation des parties prenantes, coopération internationale.

⁶⁴ National Program on Climate Change, Work Plan for Controlling Greenhouse Gas Emissions during the 12th Five-Year Plan Period, Comprehensive Work Plan for Energy Conservation and Emission Reduction for the 12th Five Year Plan Period, 12th Five Year Plan for Energy Conservation and Emission Reduction, 2014-2015 Action Plan for Energy Conservation, Emission Reduction and Low-Carbon Development, National Plan on Climate Change (2014-2020) – source, INDC de 2015, <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/China/1/China%27s%20INDC%20-%20on%2030%20June%202015.pdf>

⁶⁵ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/0199_Non_paper_FR_soft_price_collar_EU_ETS.pdf

⁶⁶ <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/China/1/China%27s%20INDC%20-%20on%2030%20June%202015.pdf>

Sur le plan des technologies, l'importance du marché chinois en fait une zone clé pour le développement de technologies propres. Par exemple, en 2015, le marché mondial des véhicules électriques et hybrides rechargeables était de 549 000 en hausse de 73% sur l'année, dont plus de la moitié soit 331 100 en Chine, en hausse de 343% sur l'année. Le cap des 2 millions de véhicules électriques et hybrides rechargeables serait passé en 2020 en Chine. Dans de nombreux cas, les nouvelles technologies propres pourraient amorcer leur développement en Chine et non plus en Europe ou aux États-Unis, dans des conditions qui pourraient en faire un leader des technologies peu émettrices dans 10 ou 20 ans.⁶⁷

5.3. Le rapport DDPP sur la Chine

Le rapport DDPP de 2015 sur la Chine « pathways to deep decarbonization in China »⁶⁸ constate les nombreux défis auxquels est confrontée la Chine : rapide développement économique, sécurisation du système énergétique, urbanisation et industrialisation, amélioration de la qualité de l'air, maîtrise des émissions de GES. Trois facteurs clés sont mis en exergue : le remplacement du charbon par l'électricité dans l'industrie, le taux de pénétration des véhicules électriques dans les transports, et le potentiel de la capture, séquestration et utilisation du carbone (en anglais « carbone capture, utilisation and storage » ou CCUS, au lieu du CCS habituel).

Le rapport DDPP propose trois scénarios, un scénario central, et deux variantes autour de ce scénario central : un scénario recourant à un fort déploiement des véhicules électriques (VE) avec un parc de véhicules privés électrique à 80 % (au lieu de 60 % du scénario central), un fret électrifié à 20 % (au lieu des 15 % du scénario central) et un transport intercity électrifié à 30 % (au lieu de 20%); et un scénario de (basse) capture et séquestration du carbone (CSC), avec une capacité de stockage de CO₂ inférieure de 1GtCO₂/an à celle du scénario central (qui table sur entre 0,1GtCO₂ et 1 GtCO₂/an en utilisation améliorée des ressources, et 1 GtCO₂/an en stockage géologique).

Le contexte reste celui d'une forte croissance économique avec une augmentation du taux d'urbanisation :

	2010	2020	2030	2040	2050
Population [Millions]	1,341	1,400	1,420	1,402	1,353
GDP per capita [\$ /capita, 2010 price]	4,604	8,819	14,504	21,432	29,270
Urbanization rate	49.3%	60%	68%	73%	75%

Indicateurs de développement et de demande de services énergétiques –

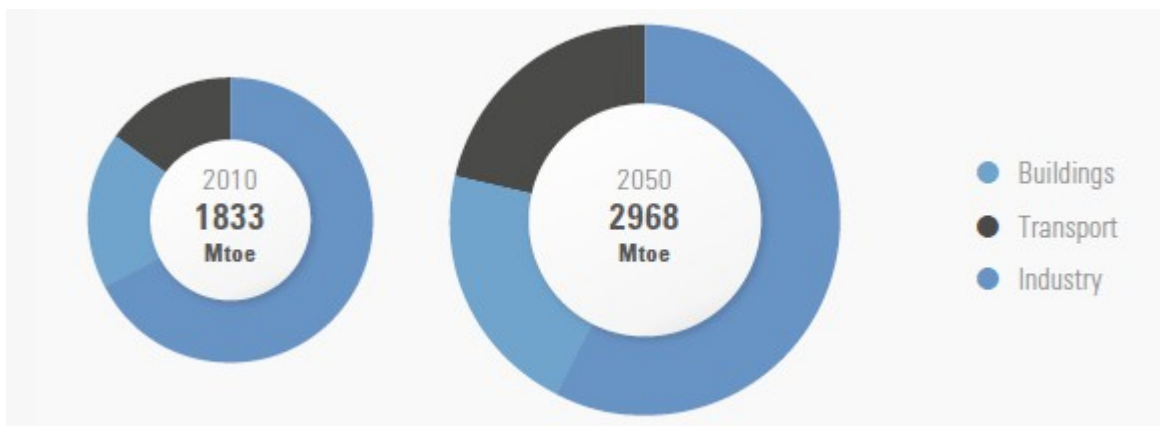
Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf

La consommation d'énergie croît, modérée par l'amélioration de l'intensité énergétique.

⁶⁷ Global and China electric vehicle BEV PHEV industry report, 2016-2020, reportsnreports

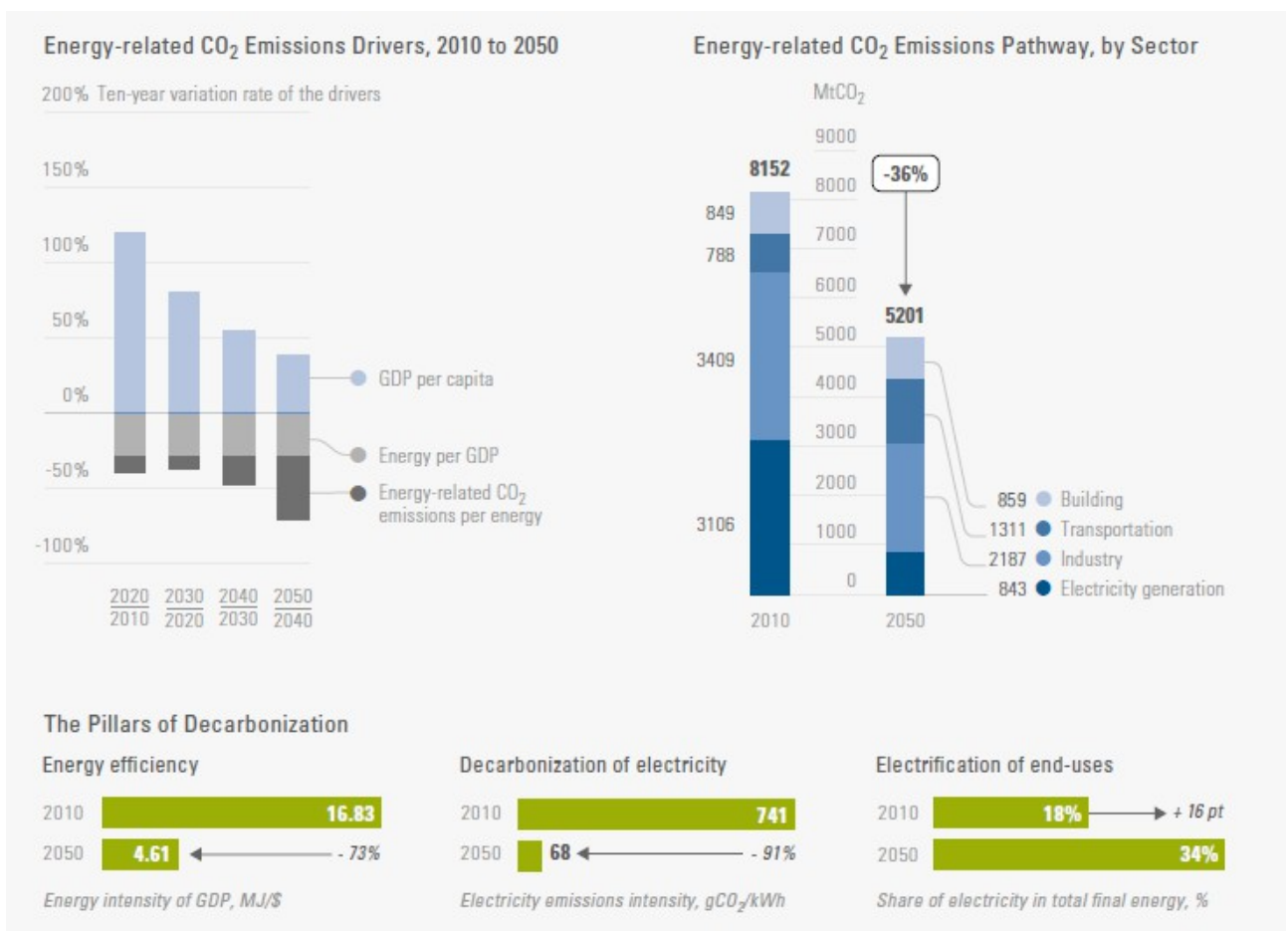
<http://www.reportsnreports.com/reports/524024-global-and-china-electric-vehicle-bev-phev-industry-report-2016-2020.html>

⁶⁸ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf



Consommation d'énergie finale en 2010 et 2050, par secteur – Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf

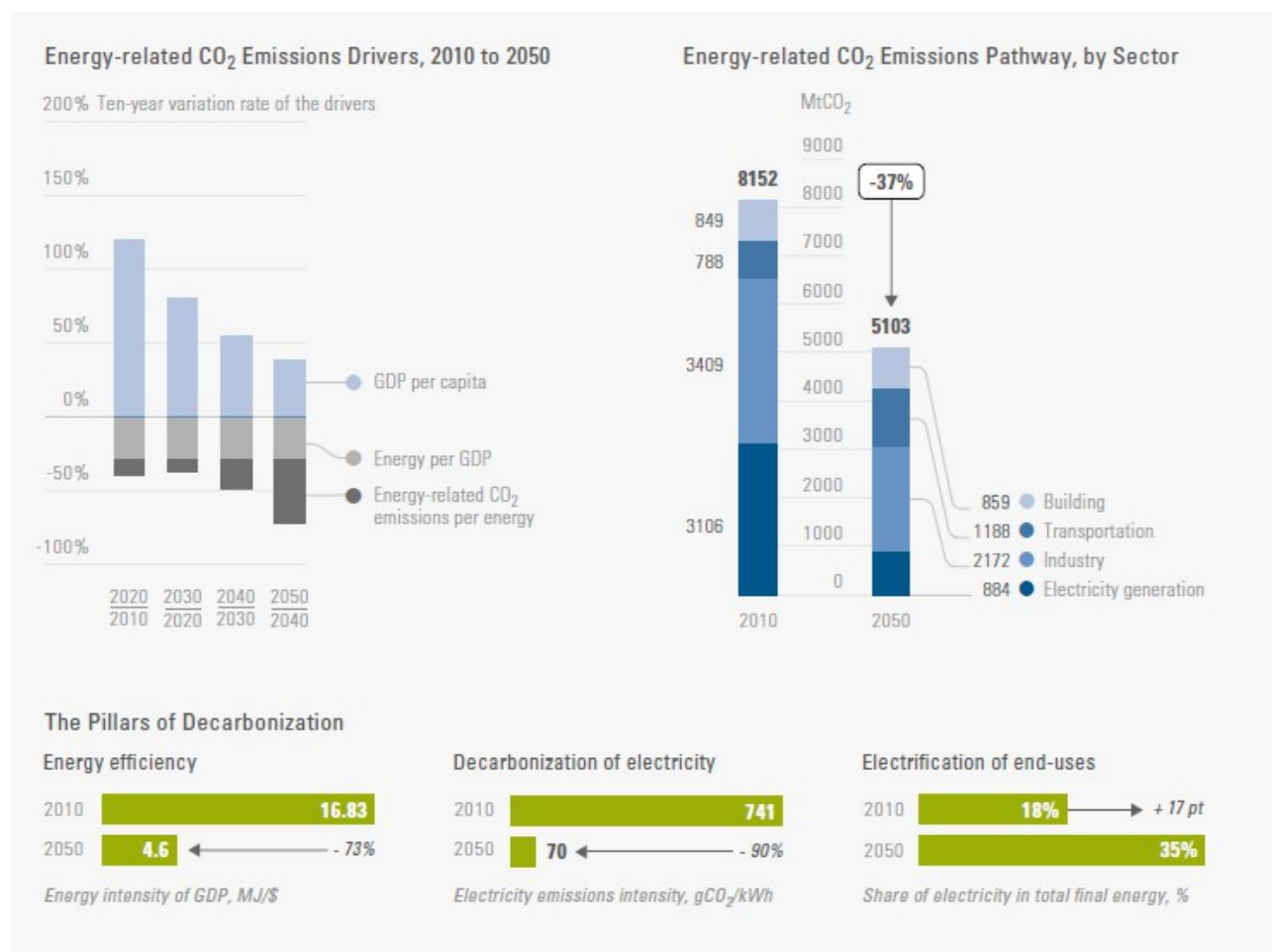
Le scénario central est bâti autour du remplacement du charbon par l'électricité, avec des étapes de part du charbon dans la production d'électricité à 57 % en 2030 et 44 % en 2040. Le taux d'électrification dans la consommation d'énergie finale passe de 18 % en 2010 à 34 % en 2050.



Scénario « central » - Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf

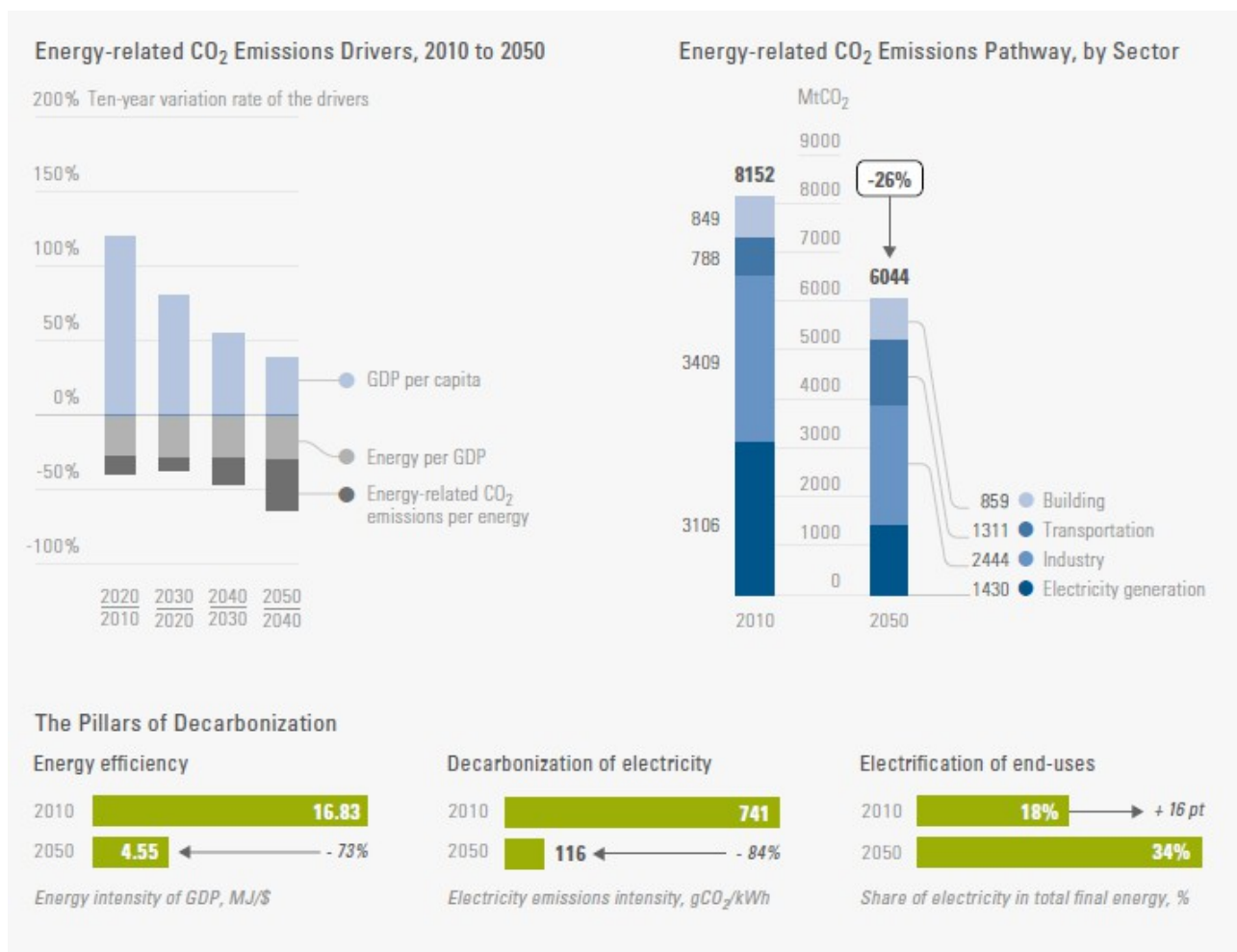
Ce scénario réduit les émissions de 36 % par rapport à 2010. Cela revient essentiellement à revenir, en 2050, aux niveaux d'émissions de 2005. L'industrie reste le premier émetteur, suivie par les transports.

Une analyse de sensibilité est ensuite conduite autour de ce scénario central. La première variante, comme vu *supra*, augmente le taux d'électrification dans les transports.



Scénario « fort VE » - Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf

La seconde variante réduit la part de CSC du scénario central de 1 GtCO₂ de stockage par an, ce qui mécaniquement augmente les émissions de 1GtCO₂/an par rapport au scénario central avec à terme une réduction d'émissions de seulement 26 % par rapport à 2010 au lieu de 36 %.



Scénario «bas CSC» - Source, http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CHN.pdf

5.4. Conclusion

La Chine est devenu en 2007 le premier émetteur mondial de GES et émet autant aujourd'hui que les USA et l'UE réunies. Ses émissions sont essentiellement liées aux secteurs industriel et de production d'énergie, secteurs cruciaux pour son développement économique qui reste une priorité, même si les problèmes de santé publique consécutifs à l'industrialisation deviennent une source de préoccupation croissante.

En conséquence la Chine semble décidée à prendre des mesures, même à court terme. Ses objectifs sont une réduction de 40 à 45 % de ses émissions -rapportées au PIB- en 2020 par rapport à 2005 (et de 60 % à 65 % en 2030), et un pic d'émissions absolues au plus tard en 2030.

Les efforts actuels portent notamment sur le déploiement de capacités considérables de production d'énergie décarbonée (hydraulique, éolien, photovoltaïque, nucléaire notamment), avec aussi des mesures dans les secteurs usagers finaux (industrie, bâtiments, transports, agriculture et UTCF).

Conclusion

Le parangonnage, même en excluant la Chine, montre une certaine diversité d'approches pour arriver *in fine* à des objectifs d'émissions par habitant qui convergeront théoriquement en 2050.

Les comparaisons avec des pays présentant des analogies de développement avec la France apportent des éléments de réflexion sur la conception d'actions publiques pour lutter contre les émissions de GES.

L'approche britannique est orientée vers l'efficience, et passe par des efforts immédiats relativement aisés, et à plus long terme par des technologies plus incertaines quant à leur réelle viabilité et leurs coûts à terme, par exemple la capture et le stockage de carbone (envisagée un temps, abandonnée, puis tout récemment réexaminée). Le pays part cependant d'émissions par habitant plutôt faibles, rendant leur baisse plus difficile a priori. Le secteur de la production énergétique (mer du Nord) important en 1990, va se contracter ce qui facilite les objectifs de réduction dans ce secteur, plus sollicité par les objectifs de réduction que d'autres secteurs comme les transports et surtout l'habitat.

L'approche allemande au contraire ne semble pas reposer sur des technologies présentant des risques d'acceptabilité encore peu cernés. Avec la sortie du nucléaire dans ce pays, elle doit donc faire la course en tête sur la production des EnR (à des coûts considérables) pour aller vers un mix décarboné. Les émissions importantes par habitant au départ (y compris en 1990 liée à l'ex-RDA) rendent le parcours apparemment plus facile, en notant toutefois l'exposition économique de son industrie lourde particulièrement importante. Cependant les objectifs de 2020 sont d'ores et déjà difficiles à atteindre sans les mesures nouvelles récemment décidées, et la trajectoire vers les objectifs de 2050 est incertaine. En tout état de cause, la transition se fera avec l'appui d'énergies fossiles carbonées.

Le cas Californien montre un état des États-Unis traditionnellement en pointe, et qui prend plus à cœur que les autres la lutte contre le changement climatique, avec des objectifs de pourcentage de réduction comparables à ceux de l'Europe, mais en partant d'une situation plus émettrice. Les moyens sont classiquement l'efficacité énergétique, puis la décarbonation de l'électricité, puis l'électrification. La forte consommation d'énergie dans un secteur des transports hypertrophié par rapport à l'Europe y offre peut-être des possibilités importantes et facilitées de réductions des émissions de GES.

Par comparaison, la situation française est marquée par un mix électrique très orienté vers le nucléaire. Elle ne dispose donc pas des gisements d'économies plus faciles de l'Allemagne ou du Royaume-Uni, ni des marges d'amélioration californiennes.

Le cas chinois illustre une approche de réduction des émissions de GES par unité de PIB, dans un pays dont le PIB par habitant reste encore loin de celui de l'Europe. Il montre aussi qu'un pays émergent (certes exceptionnel par sa taille) peut devenir une des principales locomotives de la demande pour les technologies de lutte contre le changement climatique, devant l'Europe et les États-Unis. Actuellement l'essentiel des émissions vient de l'industrie et de la production d'énergie, avec un mix énergétique particulièrement carboné, mais aussi de très importants efforts en matière de développement de source d'énergie plus propres, entre autres pour des raisons de santé publique,

En dehors des questions d'acceptabilité sociale, les technologies devraient être disponibles à peu près en même temps au plan mondial, ce qui montre l'importance des efforts des pouvoirs publics pour en accélérer l'adoption et l'usage dans leurs pays, au-delà de l'effort bien sûr indispensable de recherche. Par ailleurs le développement en ordre dispersé de marchés du carbone, certes encore non connectés (avec des exceptions), est un premier pas prometteur pour une tarification du carbone plus répandue.



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

Annexe thématique sur les transports

Rapport n° 008378-02
établi par

Pascal DOUARD, Jean-Michel NATAF (coordonnateur), Gilles PIPIEN et Alain SAUVANT

Février 2017



Les auteurs attestent qu'aucun des éléments de leurs activités
passées ou présentes n'a affecté leur impartialité dans la rédaction
de ce rapport.

Sommaire

1. Bilan des évolutions passées.....	6
1.1. Les transports, premier secteur émetteur de GES à près de 30 % du total.....	6
1.1.1. <i>Des émissions de GES transports en recul cette dernière décennie, mais moindre que les autres secteurs.....</i>	6
1.1.2. <i>Des émissions jusqu'en 2014 cohérentes avec l'objectif fixé par la loi Grenelle 1 d'émissions 2020 au niveau des émissions 1990.....</i>	7
1.1.3. <i>Mais largement du fait de la hausse globale des prix du pétrole depuis 1998..</i>	8
1.1.4 <i>Le prix du pétrole est bas à nouveau depuis 2014, d'où une évolution 2015 GES préoccupante.....</i>	12
1.2. Quelques mesures de limitation des émissions de GES transports toutefois.....	12
1.2.1. <i>La politique de réduction des consommations unitaires (accord ACEA, bonus malus automobile) est susceptible d'avoir produit quelques effets.....</i>	12
1.2.2. <i>D'avantage d'énergies renouvelables dans les énergies transport, mais le sont-elles vraiment ?.....</i>	15
1.2.3. <i>Pas d'effet visible du report modal malgré des efforts financiers sans précédent.....</i>	16
1.2.4. <i>Des mesures diverses ne visant pas le GES mais qui présentent un effet positif néanmoins.....</i>	19
2. Les apports possibles des nouvelles motorisations et technologies des véhicules.....	21
2.1. Panorama des nouvelles motorisations et technologies des véhicules.....	21
2.2. Quelques éléments de méthode pour se repérer dans les choix technologiques de transports.....	21
2.2.1. <i>Considérations générales.....</i>	21
2.2.2. <i>Importance du contenu carbone de l'énergie utilisée.....</i>	22
2.3. Quelques perspectives technologiques.....	23
2.3.1. <i>L'allègement des véhicules et l'aérodynamisme est intéressant pour toutes les motorisations.....</i>	23
2.3.2. <i>Les moteurs à combustion interne ont encore des marges d'amélioration.....</i>	24
2.3.3. <i>Les nouvelles normes d'émission envisagées pour 2025 liées aux économies en carburant.....</i>	27
2.3.4. <i>Un marché des hybrides qui décolle, mais le bilan GES est il vraiment amélioré en circulation réelle ?.....</i>	28
2.3.5. <i>Les véhicules hybrides rechargeables et les véhicules électriques présenteront probablement vers 2025 le plus faible coût sur le cycle de vie pour leur utilisateur.....</i>	30
2.3.6. <i>Des risques sur l'approvisionnement en minéraux critiques comme le lithium et le néodyme.....</i>	36
2.3.7. <i>Le véhicule électrique présente d'autres risques pour l'environnement.....</i>	40
2.3.8. <i>Le contexte d'un mix électrique européen moins décarboné que le mix français rend le véhicule électrique néanmoins intéressant, et l'importance de différer la charge dans la nuit grâce à une tarification temporelle.....</i>	42
2.3.9. <i>Le véhicule électrique et le véhicule hybride rechargeable ne sont intéressants sur le plan GES que si l'électricité est largement décarbonée, ce qui est le cas aujourd'hui en France.....</i>	50

2.3.10. Impact de l'électrification du parc routier sur la demande électrique.....	57
2.3.11. Les motos et scooters électriques sont plus chères à l'achat mais deviennent compétitives sur le cycle de vie.....	58
2.3.12. La prise électrique, vraisemblable goulot d'étranglement, nécessitera au bon moment des mesures de mise aux normes obligatoires des parkings de logements collectifs et des entreprises.....	60
2.3.13. Le GPL plus intéressant pour la pollution locale que pour les GES.....	63
2.3.14. Le bio-GPL, des perspectives pour les déchets, mais des questions au-delà.....	64
2.3.15. Le GNV et le GNL sont également surtout intéressants pour la pollution locale ; du point de vue GES leur potentiel comme carburant de transition pourrait être limité dans certains pays du fait des fuites à la production et à la distribution....	65
2.3.16. Le bio-gaz est intéressant lorsqu'on le produit à partir de déchets, mais au-delà il rentre souvent en compétition avec la filière alimentaire et pourrait réchauffer à cause des fuites.....	72
2.3.17. Les bio- et agrocarburants risquent d'atteindre assez vite des limites liées à la compétition avec la filière alimentaire et la rareté des sols, et posent peut-être aussi des problèmes liés aux fuites.....	73
2.3.18. Le véhicule à hydrogène ne semble plus poser de difficultés techniques ou de sécurité (véhicule et chaîne d'approvisionnement), mais sa viabilité économique en fait une solution potentielle à moyen terme seulement.....	78
2.3.19. Le véhicule à air comprimé, véhicule avec une autonomie limitée mais adaptée à des trajets urbains, mériterait un regard complémentaire.....	84
2.3.20. Le véhicule solaire, une idée pour les zones ensoleillées, qui décentralise la production d'électricité mais à potentiel qui reste limité.....	87
2.3.21. Le transport routier de marchandises.....	88
2.3.22. L'électrification des autobus urbains est faisable dès 2025, et des autocars de lignes sur trajets de moins de 300 km un peu plus tard vers 2030.....	92
2.3.23. La réglementation européenne sur les émissions des PL.....	93
2.3.24. Le transport maritime et le transport fluvial présente des possibilités raisonnables avec les biocarburants et le recours complémentaire à l'énergie du vent.....	93
2.3.25. Le transport ferroviaire et les tramways sont déjà très décarbonés, mais l'usage des bio-carburants semble approprié pour traiter la traction thermique.....	97
2.3.26. Le transport aérien est un objet majeur de préoccupation, et surtout le transport aérien international.....	97
2.4. Résumé des sujets liés aux motorisations et aux sources d'énergie.....	108
2.4.1. Utilité et nécessité d'un prix du carbone.....	109
2.4.2. Attrition du moteur thermique.....	109
2.4.3. Le droit à la prise électrique.....	110
2.4.4. Une gestion intelligente de la charge sur le réseau due à la charge des véhicules électriques.....	110
2.4.5. Une nécessaire analyse du cycle de vie.....	111
2.4.6. Vers une électrification interurbaine ciblée.....	111
2.4.7. Des infrastructures de recharge électrique rapide.....	111
2.4.8. Œuvrer à la décarbonation des deux-roues.....	112
2.4.9. Les biocarburants de seconde ou troisième génération.....	112
2.4.10. Inclure le mode maritime dans les échanges de droits d'émissions.....	113
2.4.11. Clarifier les contributions du mode aérien et les inclure dans les échanges de droits d'émissions.....	113

2.4.12. Un exemple de simulation : difficultés de réduire les émissions des transports dans un contexte de croissance.....	115
--	---------------------

3. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios postérieurs à 2013.....

3.1. Principales évolutions du système des transports de 2013 à 2016.....	120
3.2. Regard sur les principaux enseignements transports du CGEDD en 2013.....	121
3.3. Regard sur les principales recommandations touchant les transports dans le rapport du CGEDD en 2013.....	123
3.4. Regard sur les volets mobilité divers exercices de prospective et scénarios de long terme.....	125
3.4.1. La vision de l'ADEME 2030 et 2050 : globalement assez réaliste, avec toutefois des interrogations sur le réalisme du report modal et de la maîtrise de la demande envisagés.....	125
3.4.2. Les scénarios DNTE.....	134
3.4.3. Le projet DDPP – septembre 2015 :.....	142
3.4.4. L'étude de l'ADEME sur un mix 100 % énergies renouvelables en 2050 – octobre 2015 :.....	151
3.4.5. Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, rapport 2013 – janvier 2014 et le rapport ANCRE sur les « decarbonization wedges » - novembre 2015.....	154
3.4.6. La Loi de transition énergétique pour la croissance verte, août 2015.....	157
3.4.7. La stratégie nationale bas carbone.....	160
3.4.8. Les scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035, publiés en 2015.....	164
3.4.9. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) des énergies renouvelables – avril 2016.....	169
3.4.10. Un modèle de courbes dynamiques d'abattement moyen des émissions de GES.....	169
3.4.11. Le scénario négaWatt, 2011.....	174
3.4.12. Le scénario transport de l'Union européenne (2016).....	179

4. Perspectives liées aux évolutions des comportements et des usages dans les transports.....

4.1. L'apparition de la contrainte carbone doit réduire la quantité et la vitesse des déplacements toutes choses égales d'ailleurs.....	185
4.2. La limitation des déplacements par la fiscalité des carburants.....	186
4.3. Le bonus-malus CO2 à l'achat automobile et la prime de conversion.....	187
4.4. La généralisation de l'électrification et des biocarburants amènera à revoir la fiscalité transports.....	190
4.5. Aperçu sur des politiques comportementales plus ciblées, leur potentiel et leur évaluation.....	191
4.5.1. Du point de vue des émissions de GES, réduire les vitesses routières interurbaines revient cher en termes de temps perdu et est moins efficace qu'une hausse de taxes sur les carburants.....	191
4.5.2. Les TIC dans la gestion du trafic ou du stationnement peuvent contribuer un peu en urbain dense.....	193
4.5.3. L'écoconduite.....	194
4.5.4. Les limites des politiques d'investissement en vue du report modal, sauf dans les très grandes villes.....	194

4.5.5. Le levier de la baisse des prix des transports collectifs s'analyse le plus souvent par d'autres considérations que les GES.....	197
4.5.6. Le péage urbain, outil souvent intéressant pour la décongestion des centres-villes, semble n'apporter rien ou très peu à la réduction des émissions de GES....	197
4.5.7. Le levier des politiques de stationnement peut apporter des réductions des émissions urbaines par une vérité des prix.....	198
4.5.8. Les voies rapides urbaines et interurbaines réservées aux véhicules peu émissifs ou partagés peuvent apporter des baisses d'émissions urbaines et périurbaines.....	203
4.5.9. Le vélo, le vélo à assistance électrique, les trottinettes électriques pourraient apporter également des solutions de mobilité sobres en GES jusqu'à 10 ou 15 km.....	206
4.5.10. Les impacts GES limités des nouveaux modes de transport interurbains (autocars et covoiturage interurbains).....	210
4.5.11. Les impacts potentiels des nouvelles formes de déplacement urbains.....	211
4.5.12. Le levier de politiques de restriction du nombre de véhicules (enchères, loterie, nécessité de détention d'une place de parking...) est moins efficace que la hausse de la TICPE pour modérer les émissions de GES.....	214
4.5.13. Les politiques d'urbanisme ne présentent que des effets à très long terme sur la densification, et dont l'ampleur est discutée.....	217
4.5.14. La fiscalité des mutations immobilières nuit à l'appariement domicile travail et donc constitue une source d'émissions de GES inutiles.....	219
4.5.15. La promotion du télétravail et de la visioconférence.....	220
4.5.16. Les risques et opportunités du véhicule autonome.....	221
4.5.17. Quelle modération de la croissance de la demande de transport aérien est envisageable ?.....	229
4.6. Bilan des politiques d'action sur les comportements et la demande et recommandations liées.....	232
5. Conclusion.....	234
5.1. Les mesures relatives aux motorisations et aux carburants.....	234
5.1.1. Les mesures relatives aux motorisations des véhicules terrestres.....	234
5.1.2. Les mesures relatives aux carburants.....	235
5.1.3. La nécessité des développements technologiques en rupture.....	236
5.1.4. Le cas du transport maritime.....	236
5.1.5. Le cas du transport aérien.....	236
5.2. Les mesures relative aux usages et aux comportements.....	237
5.2.1. D'abord la hausse des taxes sur les carburants fossiles.....	237
5.2.2. Privilégier les politiques de demande pour les transports collectifs avant les politiques d'offre.....	237
5.2.3. Un inventaire à effectuer pour les effets des nouvelles mobilités.....	237
5.2.4. La vitesse semble davantage ressortir de politiques de sécurité et locales..	238
5.2.5. La fiscalité sur les mutations immobilières présente vraisemblablement des effets de distorsion négatifs.....	238
5.2.6. Le développement du véhicule autonome présente des opportunités (partage) mais aussi des risques (allongements des distances parcourues).....	238
5.2.7. La réduction des circulations a des effets majeurs sur le mode de vie et l'activité.....	238
5.3. Esquisse de bilan global.....	239

5.4. L'analyse socio-économique des mesures doit être renforcée.....	240
--	---------------------

1. Bilan des évolutions passées

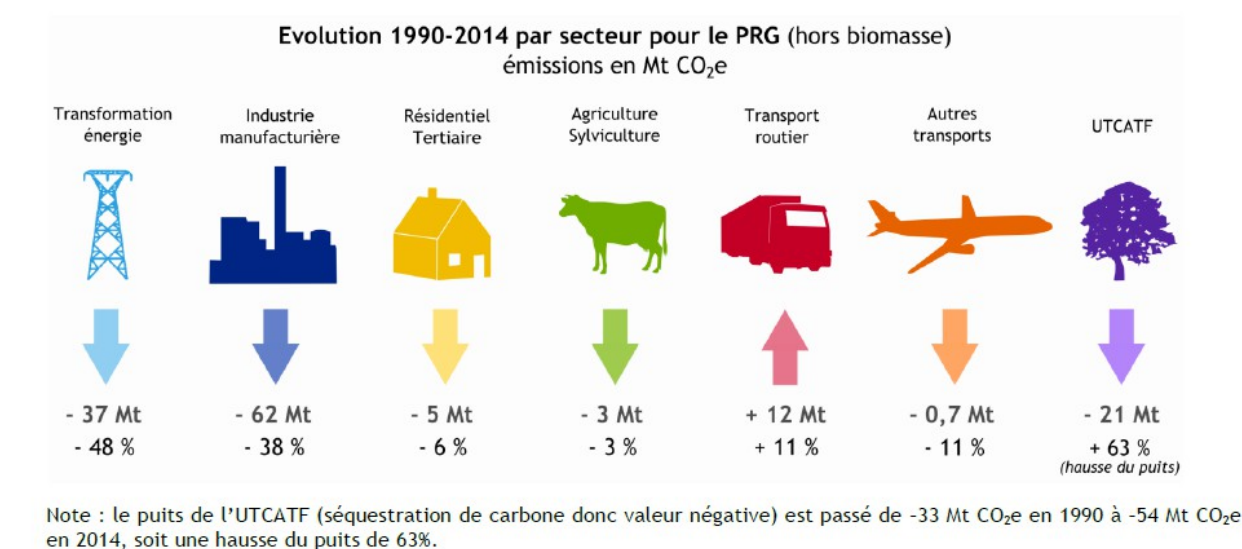
1.1. Les transports, premier secteur émetteur de GES à près de 30 % du total

1.1.1. Des émissions de GES transports en recul cette dernière décennie, mais moindre que les autres secteurs

D'après le rapport de la Commission des comptes transports de la Nation CCTN (2015) (section D3,1), le transport (déplacements hors construction des équipements et des infrastructures) est le secteur qui émet le plus de gaz à effet de serre (GES) en France (28,9%) soit 135,4 MtCO₂eq/an.

Les émissions françaises de GES liées au transport ont atteint leur maximum vers 2003 et ont baissé depuis globalement. Elles sont cependant en progression en 2015 par rapport à 2014 (+0,9%).

La part des transports dans les émissions de GES se situe globalement en hausse, puisque cette part ne représentait que 22 % en 1990 contre près de 29 % actuellement. Le rapport au format SECTEN du CITEPA pour 2014 montre d'ailleurs que seules les émissions du transport routier à se situent en hausse depuis 1990 alors que tous les autres secteurs étudiés sont en baisse.

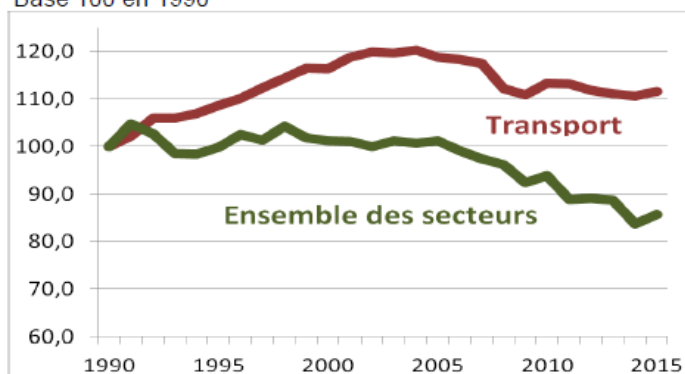


Source ; CITEPA, inventaire SECTEN,

<http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>

Figure D3.1-3 Émissions françaises de GES depuis 1990

Base 100 en 1990



Source : Citepa / CITEPA / rapport SECTEN 2016 - Format

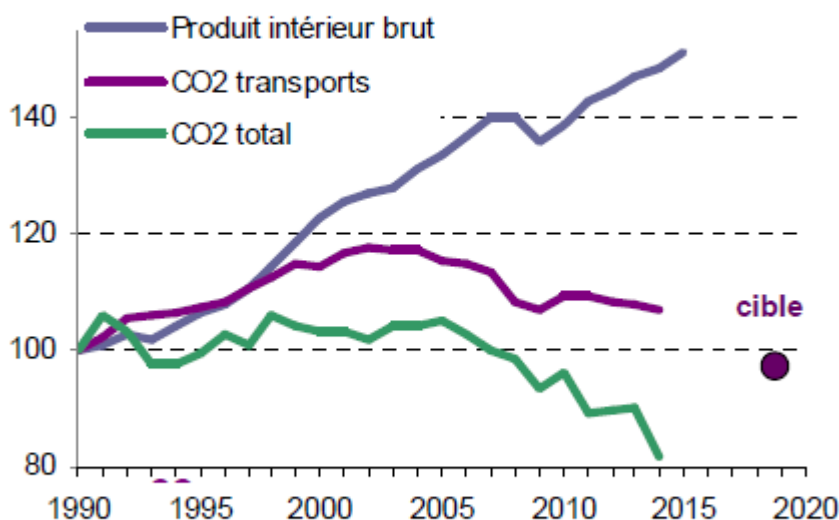
Source ; CITEPA, inventaire SECTEN, <http://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten>

1.1.2. Des émissions jusqu'en 2014 cohérentes avec l'objectif fixé par la loi Grenelle 1 d'émissions 2020 au niveau des émissions 1990

Le graphique ci-dessous montre globalement une trajectoire permettant d'espérer atteindre la cible fixée par l'article 10 de la loi Grenelle 1 d'une diminution de 20 % des émissions du secteur transport pour les ramener à leur niveau de 1990 à échéance 2020.

Figure D1-1 Émissions de CO₂, totales, dans les transports et PIB

Indices base 100 en 1990 en %



Source : SOeS, d'après Citepa et Insee

Évolution des émissions de CO₂ dans les transports – Source, SOeS

Cependant en 2015 les émissions de GES du secteur des transports ont augmenté de 0,9 % comme mentionné *supra*.

1.1.3. Mais largement du fait de la hausse globale des prix du pétrole depuis 1998

L'analyse plus détaillée montre que ces résultats, plutôt rassurants jusqu'en 2014, pourraient cependant être expliqués dans une grande mesure par des raisons largement conjoncturelles.

1.1.3.1. Prépondérance des émissions du secteur routier

Les émissions de GES du transport proviennent très largement du transport routier (92,8 % des GES en 2015 et 95,2 % du CO₂ en 2014) (source CCTN D3.1). Parmi celui-ci, les voitures particulières (VP) émettent 53,3 % des émissions du transport routier. L'analyse doit donc concerner en première approche le transport routier et en premier lieu les VP parmi ce dernier.

Pour effectuer cette analyse, on peut écrire la relation suivante et en examiner les évolutions des différents termes de l'équation suivante :

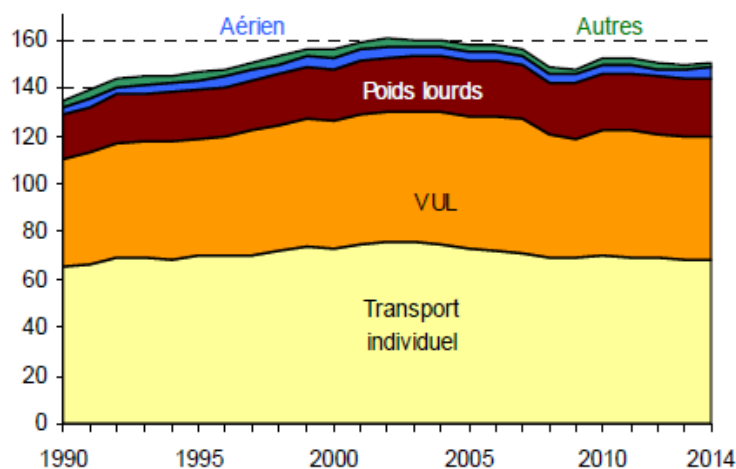
$$Emissions_{GES} = Circulations \times (Consommations / Circulations) \times (Emissions_{GES} / Consommations)$$

Depuis environ 2003, la circulation routière des VP a globalement stagné.

Leurs consommations de carburant a légèrement régressé du fait de mesures sur les consommations unitaires. Les émissions elles-mêmes par rapport aux consommations ont également baissé.

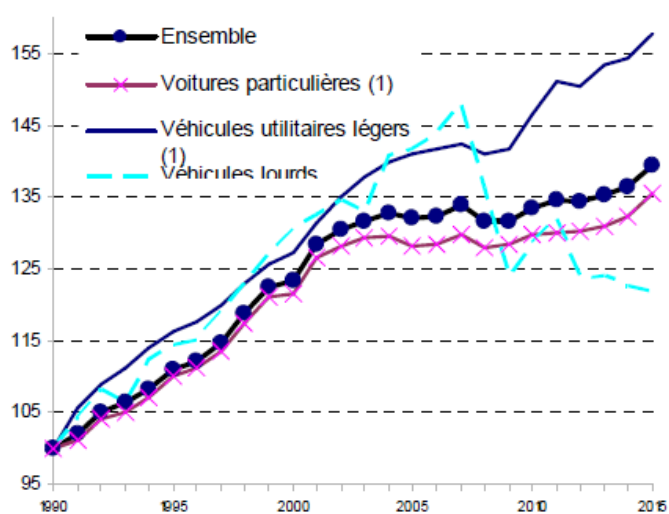
Le premier terme (circulations) a été déterminant dans le changement de tendance depuis 2003 environ.

**Figure D1-2 Évolution des émissions de CO₂
par type d'émetteur dans les transports**
en Mt CO₂



Source : SOeS, d'après Citepa

Figure G1-3 Circulation routière par type de véhicule
Véhicules kilomètres, base 100 en 1990



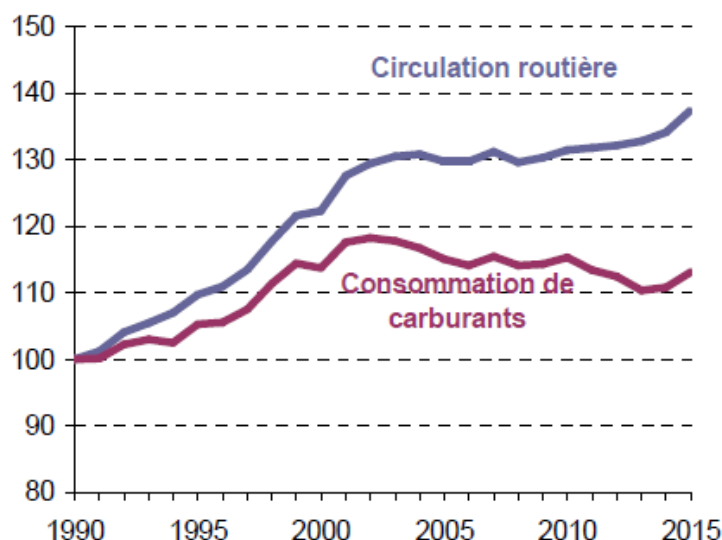
(1) Les VUL étrangers sont classés avec les voitures particulières

Champ : France métropolitaine

Source : SOeS, Bilan de la circulation

Figure D2-5 Évolution de la circulation et de la consommation de carburant des voitures particulières

Indice base 100 en 1990



Source : SOeS

Sources : Rapport CCTN 2015

1.1.3.2. Impact décisif des prix du pétrole sur la circulation et les émissions

La décennie des années 2000 a été marquée par une hausse globale marquée du prix du pétrole, passant d'un point bas proche de 10\$ par baril vers 1998 à plus de 140\$ par baril en 2008 ; après une assez brève chute en 2009, ce prix a oscillé autour de la centaine de \$ par baril, pour ensuite chuter fortement à partir de fin 2014 avec un point bas vers 30\$ le baril. Le taux de change €/ \$ a un peu fluctué, les marges de raffineries également, mais la tendance générale de la décennie et demi de 1998 à 2014 a été à la hausse. De plus, la croissance économique a plutôt eu tendance à se ralentir dans cette période.

On peut effectuer un calcul sommaire pour estimer l'impact prix du pétrole. Si l'on retient un prix du pétrole de 20 dollars vers 2000 et 100 vers 2014, et un taux de change proche de 0,9 euros par dollar, et 0,7 euros par litre de taxes de raffinage et transports et distribution, le prix des carburants pourrait passer de 81 centimes à 127 centimes par litre environ.

Avec une élasticité de -0,3 à moyen-long terme¹ des circulations aux prix des carburants, cela amène à une chute des consommations de l'ordre de 12 %. Elles atteindraient donc environ 150 en indice base 100 en 1990 dans le graphique ci-dessus à prix du pétrole constant, montrant ainsi que l'effet hausse prix du pétrole

¹ Cf par exemple page 27 (élasticité utilisée par le CGDD sur France tous trafics véhicules-km VP à -0,29 à long terme) déterminants structurels et conjoncturels du trafic, Setra, 2013, http://www.infra-transport-materiaux.cerema.fr/IMG/pdf/1345w-rapport_determinants.pdf

semble explique l'essentiel des évolutions de la croissance des circulations, la baisse de la croissance du PIB pouvant expliquer une grande part du reliquat probablement.

Il est donc logique que la tendance générale des circulations VP se soient situées en inflexion forte par rapport à celle d'avant 2003. Celle des PL a été plus lourdement marquée par l'impact du ralentissement économique et d'une certaine désindustrialisation à partir de la crise de 2008. Seules les circulations de VUL sont restées en forte hausse.

D'autres facteurs peuvent certes avoir joué, par exemple des effets d'arrivée à une certaine maturité du parc VP notamment du fait d'effets de cohortes démographiques. La croissance provenant pour partie du remplacement de générations modérément motorisées, ayant passé le permis vers les années 1950 ou 60, surtout les femmes, par des générations pleinement motorisées. Les générations qui ne conduisent plus ont 75 ans en 2010. Elles ont eu l'âge de passer le permis vers 25 ans en 1960. Jusqu'à cette décennie, celles-ci étaient modérément motorisées, leur remplacement contribuait à la croissance des circulations, mais ce n'est plus le cas. Un modèle « âge-période-cohorte » comme celui de Jean-Loup Madre² permettrait de préciser l'ampleur de cet effet.

Les mesures prises dans les grandes villes limitant l'attrait des VP peuvent également avoir joué un peu. Cependant, il est vraisemblable que l'effet prix du pétrole ait joué un rôle majeur.

Il convient également d'aborder le sujet spécifique des poids-lourds. Les circulations des véhicules lourds ont atteint (cf graphique CCTN ci-dessus) un maximum en 2007, puis ont fortement baissé lors de la crise de 2008, et ont continué de baisser depuis.

Le trafic PL est élastique à la croissance économique, avec une élasticité du trafic tous réseaux au PIB³ proche de 0,7. Le PIB en volume a chuté de 2,9 % pour remonter après, d'où une évolution globale de 4 % de début 2008 à 2015.

Plutôt que le PIB, c'est probablement la production industrielle qu'il conviendrait d'utiliser. L'indice de la production industrielle (CVS CJO) était de 113,86 en décembre 2007 et a atteint en décembre 2015 100,72, soit une chute de 13 %, montrant une désindustrialisation du PIB. Si on assimile l'élasticité à la production industrielle à celle du PIB, soit 0,7 environ, on pourrait ainsi expliquer environ une chute de 9 % du trafic lourd en France entre 2007 et 2015, contre les 15 % environ constatés.

Le prix du pétrole a baissé depuis fin 2014, donc cette évolution a dû plutôt aller dans le sens d'une hausse des trafics. Les 6 % de baisse supplémentaire (au-delà des 9 % expliqués) des trafics PL constatée restent donc à expliquer. Peut-être sont-ils pour partie liés à des effets de gains de productivité du transport routier de marchandises.

Le trafic des véhicules utilitaires légers (VUL) est encore plus dynamique que celui des véhicules particuliers. Il s'agit d'un trafic assez complexe à expliquer, une partie pouvant s'apparenter aux VP, une autre à des services de transports de colis ou à des déplacements professionnels.

² <http://simbad.laet.science/documents/seminaire/010411/JLMadre.pdf> (modèle âge cohorte période, Jean-Loup Madre, DEST, IFSTTAR)

³ Voir par exemple estimation des élasticités des trafics routiers et ferroviaires au PIB, 2013, CGSP, <http://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/Estimation-des-%C3%A9lasticit%C3%A9s-des-trafic-routiers-et-ferroviaires-au-PIB.pdf> page 14

1.1.4 Le prix du pétrole est bas à nouveau depuis 2014, d'où une évolution 2015 GES préoccupante

Du coup, en 2015, avec la baisse forte des prix du pétrole, l'augmentation des circulations (2,2 % pour les VP françaises de 2014 à 2015), les émissions de GES des transports reprennent le chemin de la croissance (+0,9%) contre une tendance à la baisse de -0,7 % en moyenne annuelle depuis 2004.



Illustration 1: Prix du pétrole Brent Londres en dollars US, source Insee

Ceci illustre la forte dépendance des émissions de GES à des facteurs exogènes comme le prix du pétrole et la croissance économique.

1.2. Quelques mesures de limitation des émissions de GES transports toutefois

1.2.1. La politique de réduction des consommations unitaires (accord ACEA, bonus malus automobile) est susceptible d'avoir produit quelques effets

Il existe toutefois des éléments positifs liés à des mesures de politiques publiques.

Un premier sujet concerne les consommations unitaires moyennes des VP : celles des VP diesel qui ont baissé de -1,2 % et celles des VP essence qui ont baissé de -1,0 %, en moyenne annuelle de 2010 à 2015. (CCTN G3)

Il est vraisemblable que la hausse du prix du pétrole depuis 1998 a aussi contribué à inciter aux choix de véhicules peu consommateurs donc peu émissifs en CO₂ également.

Si l'on estime une élasticité de moyen long terme de -0,5 des consommations au prix des carburants (un peu plus élevée en valeur absolue que celle des circulations du fait de l'effet des prix des carburants sur les choix de véhicule), avec les mêmes hypothèses que ci-dessus pour les évolutions des prix des carburants, l'indice base 100 en 1990 des consommations serait un peu en dessous de 150. L'inflexion de tendance semble donc largement imputable aux évolutions du prix du pétrole depuis 2000 environ.

L'effet de baisse des consommations et donc des émissions de CO₂ (à la diésélisation près) provient probablement un peu aussi du progrès technique, aiguillonné par la combinaison de l'accord volontaire ACEA (Association des constructeurs européens d'automobiles) d'une part et du bonus malus automobile d'autre part.

Cependant, une partie de cet effort semble illusoire. En effet, sur plusieurs types de véhicules VP en Europe, d'après l'ICCT (International Council on Clean Transportation) en mai 2016, il y aurait des divergences croissantes entre les émissions officielles et les émissions réelles de CO₂, de 37 % en 2014⁴, le débat étant en cours avec une zone grise importante dans la manière d'interpréter certaines réglementations.

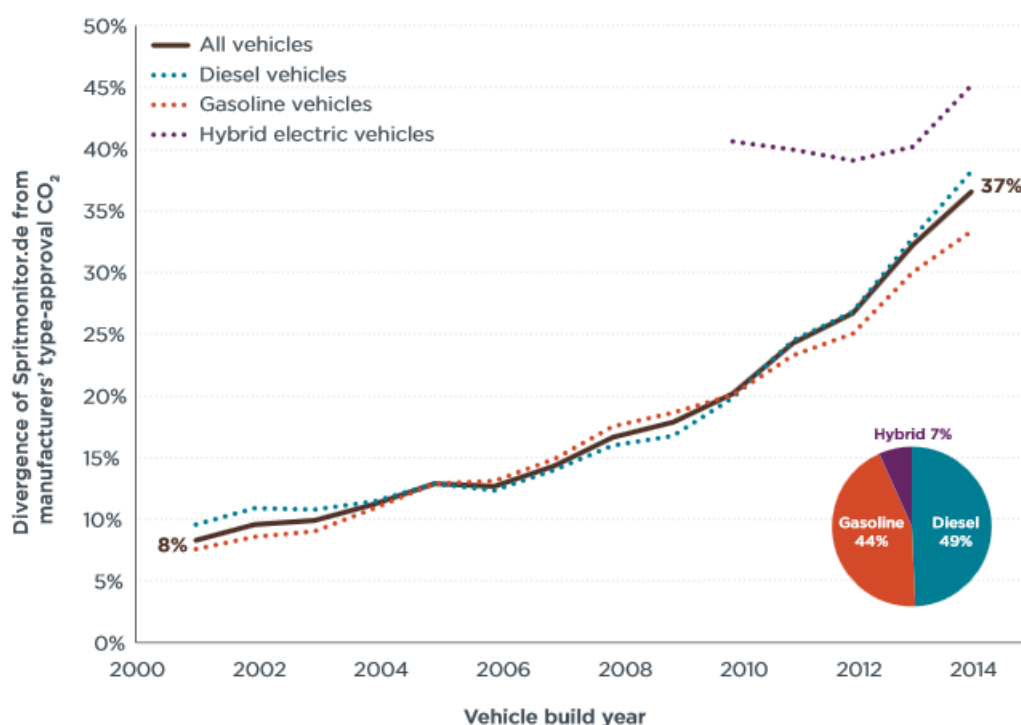


Figure 5. Divergence of Spritmonitor.de from manufacturers' type-approval CO₂ emissions by fuel type (pie chart indicates the share of vehicles per fuel type in the data set for 2014).

Etude ICCT From laboratory to road, september 2015 white paper

http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LaboratoryToRoad_2015_Report_English.pdf

⁴ <http://www.dw.com/en/study-most-eu-carmakers-report-false-co2-emissions/a-19250251>

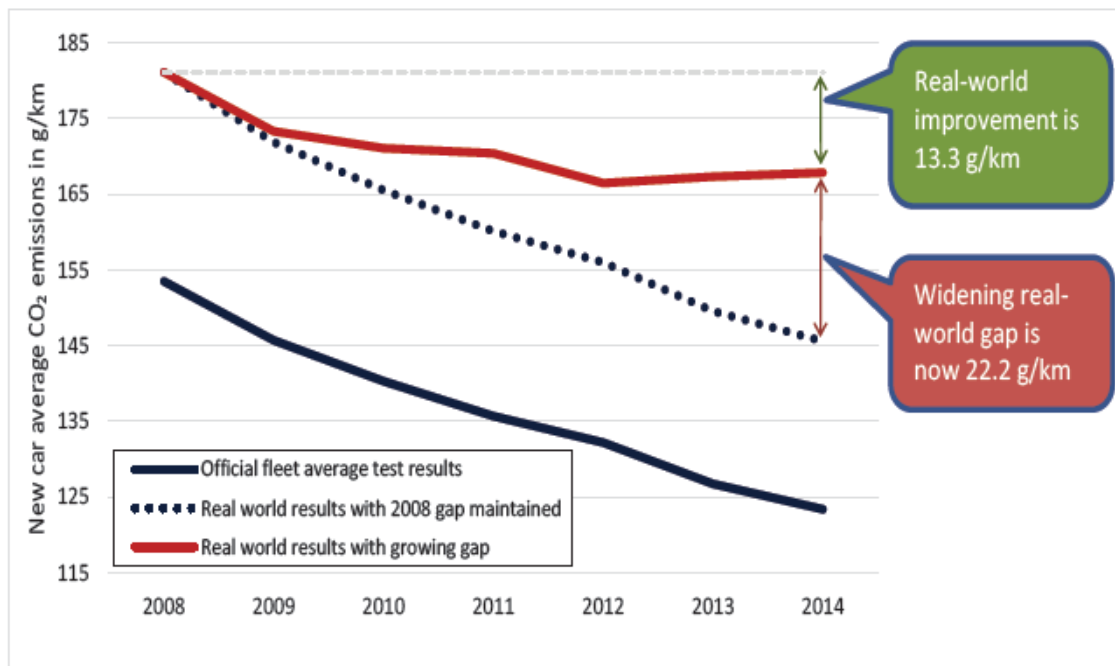


Fig 3: Official CO₂ test results versus the real-world outcomes in 2014 for private motorists (derived from ICCT, 2015 and EEA official CO₂ data)

Source : *Mind the gap 2015*, European federation for Transport and the environment, septembre 2015

https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE_Mind_the_Gap_2015_FINAL.pdf

Il conviendrait d'examiner comment ceci pourrait impacter ou pas le bilan de circulation présenté par le SOeS cité plus haut. A priori, celui-ci tient compte des livraisons de carburant ce qui donne un point de vérification, ceci dit les soldes aux frontières, les autres usages du gazole que le transport, les incertitudes sur la taille du parc et sur son usage doivent amener à prendre les séries présentées avec de la prudence. Une note de synthèse du Service Économie et Statistique (SES) ancienne de 2000⁵ indique le recours au panel Secodip concernant des véhicules en cours de vie réelle, ce qui semble plutôt rassurant.

Il est possible qu'il reste un petit effet de baisse d'émissions liées à l'amélioration du parc, mais difficile à évaluer précisément du fait des incertitudes importantes constatées sur les émissions unitaires et la vérification par les livraisons de carburants en France atteint des limites liées aux estimations des soldes aux frontières qui ne sont pas bien connues non plus, ainsi que celles sur l'effectif précis du parc roulant. que l'on reconstitue mais ne connaît plus directement depuis la fin de la vignette auto.

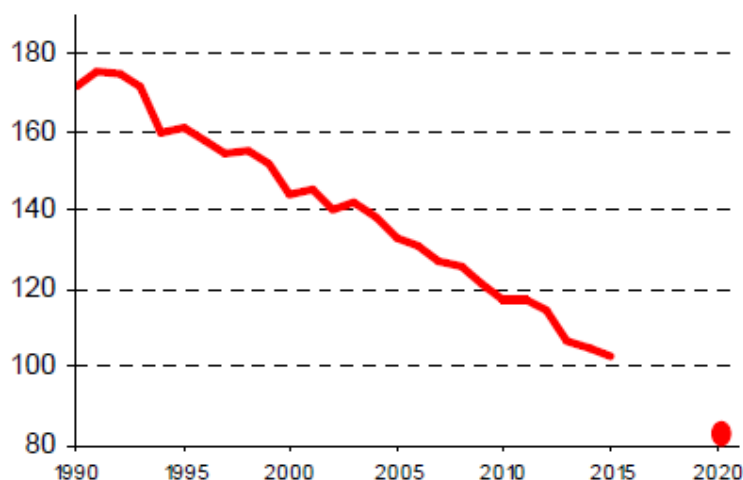
Dans le domaine aérien, les émissions unitaires de CO₂ en gCO₂/passager.km continuent leur baisse, et semblent dans un parcours cohérent avec leur cible. Là aussi la hausse du prix du pétrole a dû aider largement à obtenir ce résultat.

⁵ Circulation et consommation de carburant en France, estimation détaillée par type de véhicules, SES, Maurice Girault, Miche Fosse, François Jeger, septembre 2000

http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Temis/0037/Temis-0037268/NS_131_3.pdf

Figure D1-5 Émissions unitaires de CO₂ de l'aérien

En gCO₂/pkm



Source : DGAC

Source : rapport CCTN 2015

1.2.2. Davantage d'énergies renouvelables dans les énergies transport, mais le sont-elles vraiment ?

La part des consommations d'énergies renouvelables dans les consommations totales de transport continue son augmentation, en cohérence avec la cible. Au vu du très faible nombre de véhicules électriques pour l'instant, de la faible évolution des parts modales du fer également, le premier effet est lié aux incorporations d'agro-carburants dans les carburants automobiles.

Les taux d'incorporation obligatoires des agrocarburants sont les suivants :

	Objectif national incorporation	Nouvelle Directive EnR 2015	Objectif national en équivalent volume	Directive et normes UE qualité (hors B30 / E85)	Règlement national de qualité, depuis 01/01/2015 (hors B30)
Biodiesel (Esters d'huiles végétales)	7,7% en PCI	inférieur à 7 % PCI	8% en volume	inférieur à 7 % en volume	inférieur à 8 % en volume
Ethanol (betterave, canne à sucre, blé, maïs...)	7% en PCI	inférieur à 7 % PCI	10,6 % en volume	inférieur à 10% en volume	

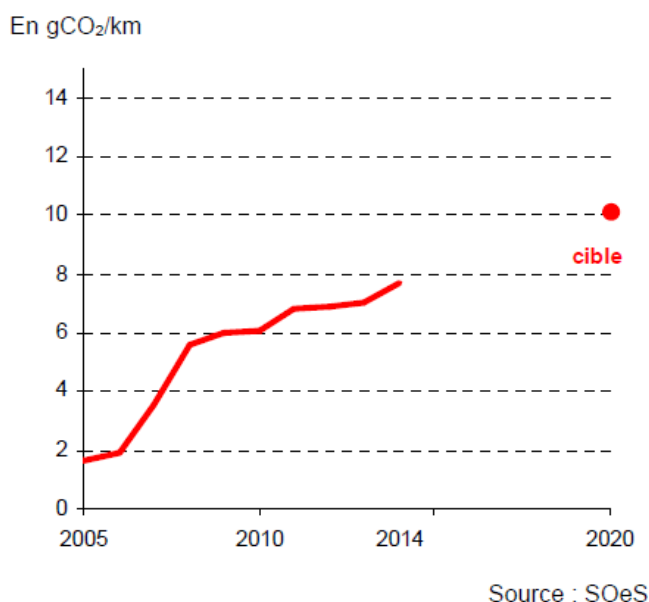
Source : Rapport Cour des Comptes 2016

Or ces agrocarburants n'ont pas toujours entraîné des réductions d'émissions de GES, dans une approche en cycle de vie, du fait des émissions occasionnées par la production des engrais azotés utilisés en général, des transports, des effets induits en termes de changement d'occupation des sols. Le bilan de cette incorporation est donc probablement moins bon qu'il apparaît à première vue, et la convention selon laquelle ces carburants n'émettent pas de GES devrait être sûrement revisitée.

De fait, un récent rapport du centre commun de recherche (JRC) de la commission européenne⁶ indique un bilan défavorable avec une hausse de 3,5 % des émissions de GES par rapport à des carburants d'origine fossile.

Par ailleurs un rapport de 2016 de la Cour des Comptes européenne détaille les faiblesses du système de certification des biocarburants durables, ce qui pourrait porter atteinte aux objectifs de l'UE pour 2020 en matière d'énergie renouvelables dans le secteur des transports.⁷

Figure D1-3 Part des consommations d'énergies renouvelables dans les consommations totales d'énergie du transport



Source : CCTN 2015

1.2.3. Pas d'effet visible du report modal malgré des efforts financiers sans précédent

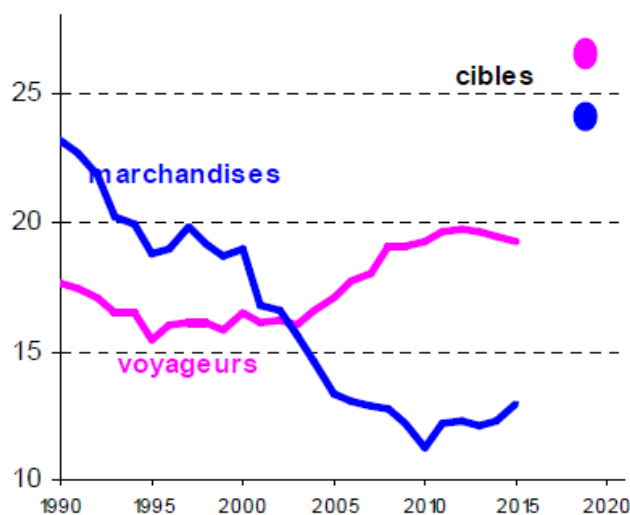
La part modale du transport collectif dans le transport intérieur terrestre de voyageurs plafonne en dessous de 20 % ces dernières années, (et à moins de 13 % pour le fer et le fluvial en marchandises) ce qui ne contribue pas non plus à la baisse des émissions de GES des transports.

⁶ Par exemple Cf Science et Vie n°1188, 1e septembre 2016

⁷ L'Énergie n°11644 à 46, 29-31 août 2016

Figure D1-4 Part du transport collectif dans le transport intérieur terrestre de voyageurs et part du ferroviaire et du fluvial dans le transport terrestre intérieur de marchandises

en %

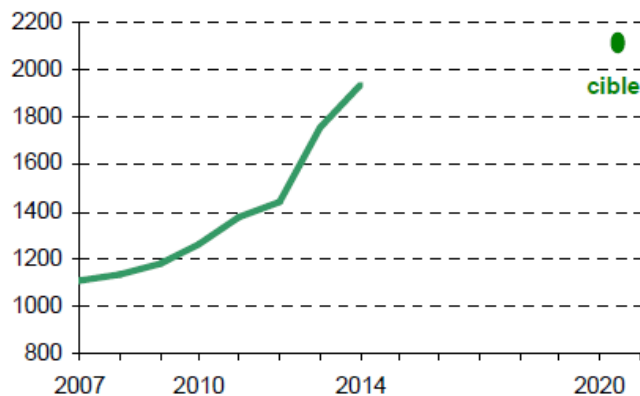


Source : SOeS

Source : CCTN 2015

Figure D1-6 Nombre de km de TCSP en service en province

En km



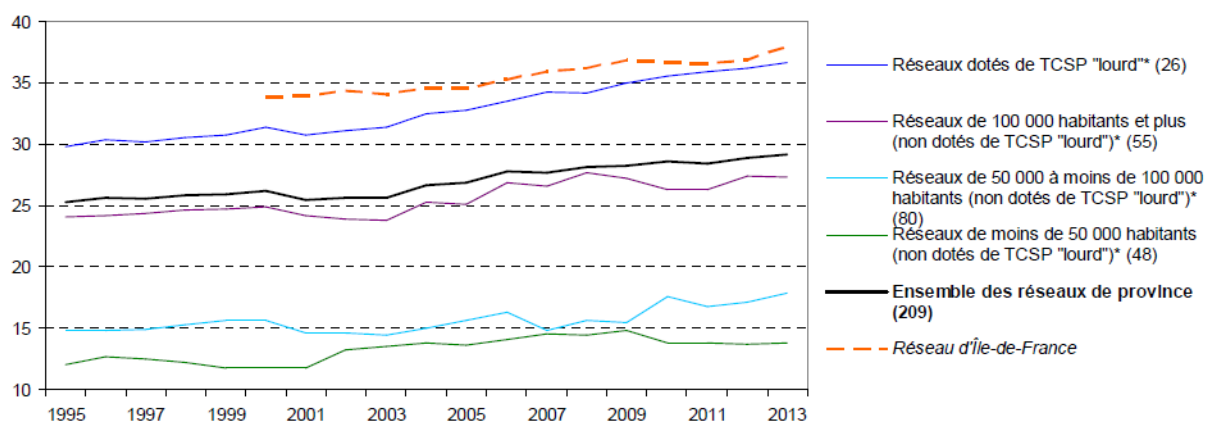
Source : Cerema (ex Certu)

Nombre de km de transport collectif en site propre (TCSP) en province -

Source : CCTN 2015

Figure F3.2-3 Évolution de l'offre kilométrique de transport collectif urbain

Offre kilométrique annuelle du PTU, de 1995 à 2013, selon la taille des réseaux (en véhicules-kilomètres par habitant).



Sources : enquêtes annuelles sur les transports collectifs urbains (Cerema, DGITM, Gart, UTP) ; STIF-Omnil pour le réseau d'Île-de-France

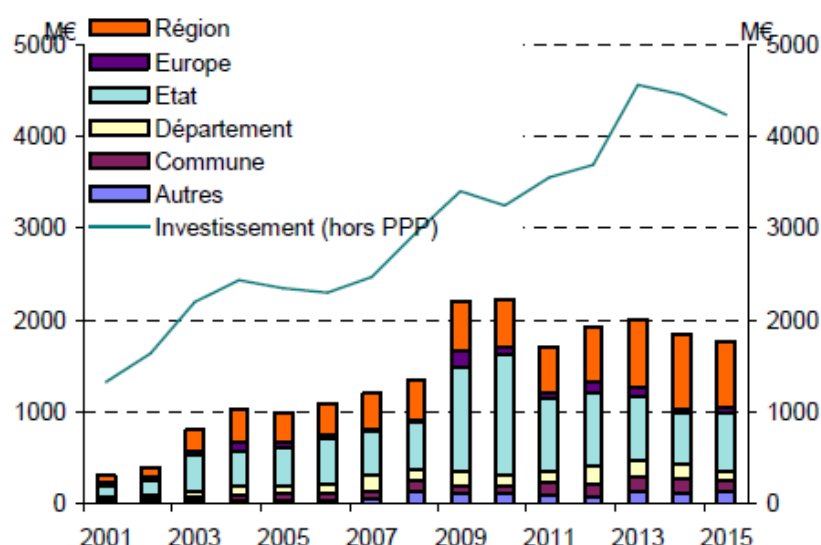
Source : CCTN 2015

Ce n'est d'ailleurs pas le rythme de construction de TCSP en province qui semble en cause, ni l'offre de transport collectif urbain (TCU) d'ailleurs, en hausse continue depuis une décennie. L'investissement dans le réseau ferré a également fortement augmenté depuis 2001, passant de 1,2 milliards d'€ à plus de 4 en 2015, et encore l'effort est probablement sous estimé car le chiffre d'investissement est hors partenariat public privé (PPP).

Ceci illustre les grandes difficultés et les grandes limites des politiques liées au report modal.

Figure A5.2-2 Évolution des investissements (hors PPP) et des subventions d'investissement reçues par SNCF Réseau selon leur origine

En millions d'euros



Source : SNCF Réseau

Source : CCTN 2015

Le rapport CGEDD facteur 4 de 2013 soulignait d'ailleurs déjà que la réduction des émissions de GES dans les transports devait essentiellement passer par des mesures sur le routier, puisque celui-ci représente la très grande majorité des circulations et des émissions, et que même dans les hypothèses les plus hautes, il n'y a pas de possibilités de report modal susceptibles de présenter un effet sur les émissions de GES à la hauteur des enjeux du facteur 4.

1.2.4. Des mesures diverses ne visant pas le GES mais qui présentent un effet positif néanmoins

Les mesures de renchérissement du stationnement, de modération des quantités offertes de places visent à réduire l'impact de la voiture en ville. Il en va aussi souvent de même avec les mesures concernant les tramways, qui sont souvent l'occasion d'une ré-allocation de l'espace urbain, ou bien de la création de pistes cyclables protégées en ville, prises pour partie sur l'espace affecté au départ aux circulations automobiles.

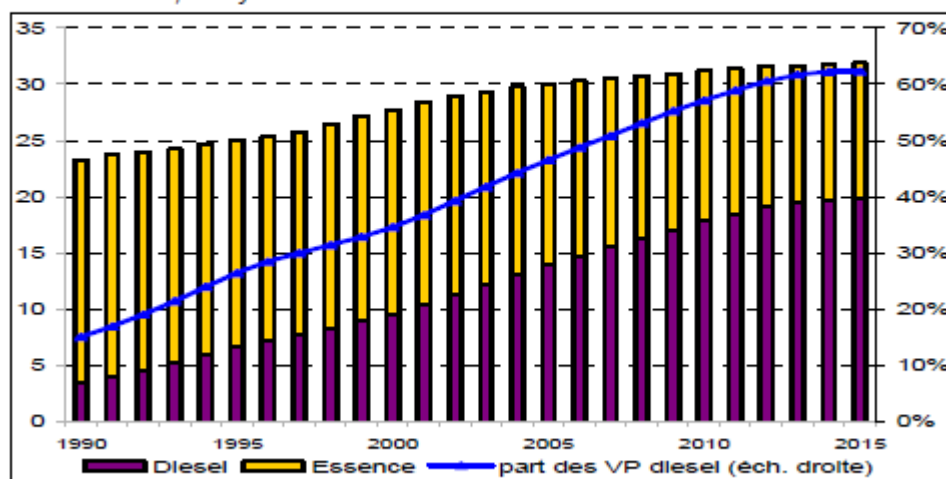
Ces politiques peuvent avoir eu un effet dé-incitatif envers les circulations routières dans les grandes villes notamment, et donc indirectement avoir contribué aussi à la modération de la croissance des circulations automobiles.

La montée en puissance du contrôle sanction automatisé peut avoir amélioré l'observance des vitesses limites, pour des objectifs de sécurité routière. Cela peut avoir également contribué à la modération des émissions.

La plus faible taxation du diesel par rapport au supercarburant a probablement contribué à la très forte diésélisation du parc de voitures particulières (VP) en France. Cette diésélisation a contribué aussi dans une certaine mesure à réduire les émissions de GES.

Figure G2-7 Parc roulant de voitures particulières selon la motorisation

En millions, moyenne annuelle



Champ : France métropolitaine.

Source : CCFA

Source : CCTN 2015

Toutefois, la diésélisation du parc VP semble stagner un peu au-dessus de 60 % depuis 2014 environ. Les politiques publiques deviennent en effet plus défavorables au diesel (hausse de TICPE, mesures d'interdiction des véhicules diesel les plus anciens à Paris à mi 2016) notamment pour des raisons compréhensibles liées à la lutte contre les polluants atmosphériques locaux, et en particulier la nocivité des particules fines liées au diesel.

Il ne semble donc pas ni possible, ni même d'ailleurs souhaitable, de miser sur la diésélisation à l'avenir pour réduire les émissions de CO₂, et donc l'effort à fournir sera plus important de ce fait.

2. Les apports possibles des nouvelles motorisations et technologies des véhicules

2.1. Panorama des nouvelles motorisations et technologies des véhicules

Plusieurs solutions technologiques sont envisageables en matière de motorisation des véhicules pour réduire les émissions de GES. On peut citer notamment :

- les perfectionnements « tendanciels » des moteurs à combustion interne (essence et diesel)
- l'incorporation de carburants provenant de sources pour partie renouvelables (éthanol, biodiesel,...)
- les véhicules au gaz (gaz de pétrole liquéfié GPL), propane ou gaz naturel (comprimé GNC, liquéfié GNL), y compris avec ajout de biogaz ou d'hydrogène
- les véhicules hybrides
- les véhicules hybrides rechargeables
- les véhicules électriques
- les véhicules à hydrogène
- les véhicules à air comprimé

Au-delà des questions de motorisation, d'autres technologies du véhicule lui-même peuvent réduire ses émissions de GES ; on peut citer notamment l'allègement des véhicules, ou son aérodynamisme, largement indépendants de la motorisation (en dehors du sujet du poids des batteries électriques). Le sujet de la marche des véhicules vers l'automatisation impacte largement les comportements et sera également traité dans le chapitre sur les actions sur le comportement.

2.2. Quelques éléments de méthode pour se repérer dans les choix technologiques de transports

2.2.1. Considérations générales

Devant la multiplicité des solutions proposées, se repérer dans les choix à effectuer n'est pas facile.

On peut cependant dégager quelques éléments de méthode fondés sur un peu de bon sens :

- il y a en première approche trois grands domaines d'utilisation des voitures particulières (VP), de poids global assez proche 30-30-40 : la circulation dans les grandes villes, la circulation dans les petites villes et le rural, la circulation interurbaine.

Pour la plupart des utilisateurs, l'interurbain est plutôt exceptionnel alors que les deux premiers domaines ressortissent plutôt de la vie quotidienne

- les besoins, par exemple en autonomie, mais aussi en termes d'optimisation des motorisations sur des cycles de type ville ou pas, sont différents ; aujourd'hui les véhicules sont assez largement peu différenciés par domaine, mais il pourrait peut-être en aller autrement à l'avenir, même si cela constituerait à l'évidence une mutation comportementale

- il y a deux grands segments dans le transport de marchandises, l'interurbain (plutôt transport de « lot » au moyen de poids lourds (PL)) et la desserte locale (plutôt de la messagerie) ; une grande partie de cette dernière est effectuée au moyen de véhicules utilitaires légers (VUL) dont les caractéristiques technologiques sont souvent assez peu différentes de celles des VP

- les motorisations nouvelles ou les perfectionnements de motorisations existantes sont susceptibles de présenter des avantages en matière de réduction des émissions de GES, mais aussi des avantages ou des inconvénients sur d'autres tableaux collectifs (pollution locale de l'air et de l'eau, bruit, dépendance au pétrole, consommation de ressources minérales rares ou moins rares, pollution lors de la construction du véhicule et de sa fin de cycle de vie, sécurité routière,...) ou individuels (vitesse maximale, accélération maximale, confort de conduite, temps de remplissage en énergie, autonomie, espace à bord du véhicule pour les passagers et leurs bagages,...) ; l'évaluation doit en tenir compte, au moins pour les principaux effets

- les émissions de GES (CO₂ mais en n'oubliant pas aussi les autres GES) et les autres avantages et inconvénients des solutions de transport doivent être appréciées non seulement pendant la vie active du véhicule, mais sur un cycle de vie complet, du berceau à la tombe, y compris pour l'empreinte de ce qui peut se passer à l'étranger

2.2.2. Importance du contenu carbone de l'énergie utilisée

On peut aussi noter que dans certains cas, particulièrement celui du véhicule électrique et du véhicule hybride rechargeable (« plug-in »), mais aussi de l'hydrogène, le bilan dépend significativement du contenu en carbone (et autres GES) de la source d'énergie qui a servi à produire l'électricité ou l'hydrogène (qui n'est qu'un moyen de stocker de l'énergie).

Il convient donc de se pencher sur le contenu en carbone de l'électricité utilisée. On ne peut à cet égard retenir uniquement une moyenne annuelle par pays ; en effet, dans un marché libéralisé dans une plaque France-Benelux-Allemagne-Suisse-Autriche et peut-être plus vaste (Espagne, Italie, Grande-Bretagne, ...) grâce à des interconnexions à terme, avec une présence limitée de mode de stockage dans le réseau d'électricité, un consommateur appelant de la puissance en pointe déclenche la mise en route de moyens de production de pointe. Ces moyens de production de pointe, sauf s'il s'agit par hasard d'une période abondante en énergies intermittentes (vent, solaire, éventuellement hydro-électricité), sont probablement fortement carbonés, le plus souvent du charbon, parfois du gaz. On ne peut donc raisonner dans un seul pays (France), malgré l'abondance du parc électro-nucléaire dans ce pays, cependant raisonner au niveau européen produit encore plus de perte d'information.

Par contre, dans tous les cas, il convient d'examiner à quelle heure et période de l'année est appelée l'électricité. En période de pointe, l'énergie supplémentaire nécessaire est carbonée. Un signal tarifaire peut alors être envisagé, via les moyens

techniques offerts par les réseaux intelligents. La spécificité du secteur des transports est que l'on peut stocker l'électricité sur batterie de véhicule électrique, et que la charge peut être effectuée à une période favorable.

2.3. Quelques perspectives technologiques

2.3.1. L'allègement des véhicules et l'aérodynamisme est intéressant pour toutes les motorisations

Actuellement, une réduction de 100 kg de la masse d'un véhicule particulier apporte une réduction des émissions de l'ordre de 5 gCO₂/km. Des réductions de l'ordre de 200 ou 300 kg semblent envisageables grâce à des nouveaux matériaux, (aluminium, composites,...) amenant un gain de 10 à 15 gCO₂/km environ. Pour mémoire un ordre de grandeur commode des émissions d'un VP est typiquement de 150 gCO₂/km⁸, avec en Europe un objectif 2015 de 130 gCO₂/km pour les véhicules neufs, en 2020 de 95gCO₂/km, et, si l'on suit une proposition du parlement européen, en 2025 de 68 gCO₂/km⁹.

Il est également possible d'agir quelque peu sur l'aérodynamisme (coefficient Cv). Ces deux améliorations sont valables quelle que soit la motorisation, en notant cependant qu'un véhicule électrique doit emporter aussi le poids de sa propre batterie.

L'évolution constatée sur longue période ne va pas dans ce sens. Une plus grande segmentation du marché selon les usages favoriserait cette diminution de masse des véhicules.

⁸ Cela dépend du type de véhicule et de la consommation. Un véhicule essence consomme typiquement de 6 à 8 litres aux 100 km et l'essence à la pompe a un facteur d'émission total de 2,7 kgCO₂/litre (2,24 en fonctionnement, 0,47 kgCO₂/l pour l'amont) selon l'arrêté du 12 avril 2012 cité dans le guide méthodologique 2012 « information CO₂ des prestations de transport » <http://www.ademe.fr/information-co2-prestations-transport-guide-methodologique>. Ce qui donne de 160 à 215 gCO₂/km et 13,5 gCO₂/l à 18 gCO₂/l si on ne considère que le fonctionnement. Un véhicule diesel consomme plutôt 5 litres aux 100 km, le facteur d'émission total est 3,1 kgCO₂/l (2,49 pour le fonctionnement, 0,58 pour l'amont) soit 155 gCO₂/km (125 gCO₂/l si on ne considère que le fonctionnement)

⁹ <http://www.ccfa.fr/L-Union-europeenne-va-introduire-163797>

Voiture moyenne : 61 ans d'évolution

	1953	1964	1974	1984	1994	2004	2014
Cylindrée (cm ³)	1 206	1 056	1 206	1 351	nc	1 679	1 509
Puissance (ch)	38	nc	57	68	nc	97	108
Couple (Nm)	nc	nc	nc	nc	nc	203	225
Longueur (m)	4,12	4,06	4,03	4,01	nc	4,13	4,21
Largeur (m)	1,56	1,55	1,58	1,61	nc	1,72	1,78
Hauteur (m)	1,29	1,43	1,44	1,41	nc	1,52	1,54
Empattement (m)	2,48	2,47	2,52	2,50	nc	2,58	2,60
Poids (kg)	846	792	893	890	nc	1 217	1 247
Poids/puissance (kg/ch)	22,3	16,2	15,7	13,1	nc	nc	11,4
Vitesse maximale (km/h)	nc	nc	nc	nc	nc	180	183
Consommation (l/100 km)	nc	nc	nc	nc	nc	5,4	4,6
Rejets de CO ₂ (g/km)	nc	nc	nc	nc	nc	nc	115
Part du diesel (%)	nc	nc	nc	nc	46	67	64

Source : l'Argus¹⁰

2.3.2. Les moteurs à combustion interne ont encore des marges d'amélioration

La première perspective est celle de l'amélioration tendancielle du véhicule à combustion interne « traditionnel ».

La limite de son rendement découle de l'analyse du cycle à quatre temps, dit encore cycle de Beau de Rochas ou cycle d'Otto, (souvent assimilé à un cycle de Carnot¹¹). L'efficacité énergétique maximale (rapport de l'énergie utile en sortie sur l'énergie fournie en entrée) ressortit à $1 - T_F/T_C$ où T_C est la température de la source chaude et T_F la température de la source froide en degrés Kelvin. Si l'on estime en première approche $T_C=550$ K (combustion de l'essence) et $T_F=295$ K environ (avec 0 degré Celsius = 273,16 K, alias 273,16 degrés Kelvin), il vient une efficacité énergétique maximum de l'ordre de 50 %.

On lit souvent un « rendement »¹² maximum en pratique de 37 % environ du fait de considérations pratiques (coefficient de 0,75 lié aux pertes de chaleur au radiateur, à la durée de l'explosion des gaz, à la sortie de chaleur par les gaz d'échappements,...) mais sans que cela résulte d'une limite théorique en réalité. La réalité des rendements constatés actuellement ressortit plutôt en dessous de 20 %, ce qui montre qu'il y a un potentiel d'un facteur de presque 2 dans l'amélioration du rendement des moteurs à combustion interne, à même température de la source chaude.

¹⁰ <http://www.largus.fr/actualite-automobile/voiture-moyenne-2014-son-evolution-depuis1953-6057388-7465959-photos.html#photos-main-titre-anchor>

¹¹ En toute rigueur, le cycle à quatre temps est un cycle limité (après admission isobare du carburant) par des lignes adiabatiques (temps 1 à 2, et 3 à 4) et isochores (2-3 et 4-1) et son efficacité énergétique est $1 - 1/(V_2/V_1)^{C_p/C_v - 1}$ alors que le cycle de Carnot est limité par des lignes adiabatiques (2-3 et 4-1) et isothermes (1-2 et 3-4). On peut cependant approximativement superposer les cycles sur un diagramme pression volume, les lignes ne se superposent pas mais sont proches

¹² En théorie le rendement est le rapport entre les efficacités énergétiques pratiques et théoriques. Par la suite on utilisera -improprement- le terme « rendement » pour décrire l'efficacité énergétique.

On pourrait concevoir d'ailleurs un meilleur rendement du moteur à combustion interne si on élevait la température de la source chaude T_c (celle de la source froide étant l'air extérieur ne pouvant être changée), par exemple au moyen d'un moteur en céramique, peu ou en tout cas moins refroidi. Le problème est que la céramique est fragile.

Le moteur à combustion externe (dit de Stirling¹³) présente un rendement de 50 % mais son poids important par unité de puissance dégagée en limite les applications pour les transports, même si la NASA aurait réalisé un moteur de ce type pour voiture particulière (Chevrolet) en 1987¹⁴, mais sans donner suite à l'époque du fait de considérations économiques. Les améliorations des dispositifs de contrôle numérique du moteur pourraient cependant donner une nouvelle vie au moteur Stirling, qui présente par ailleurs l'avantage de pouvoir consommer d'autres carburants, y compris de la biomasse, puisque la source chaude n'a pas besoin d'être aussi chaude pour obtenir un rendement correct.

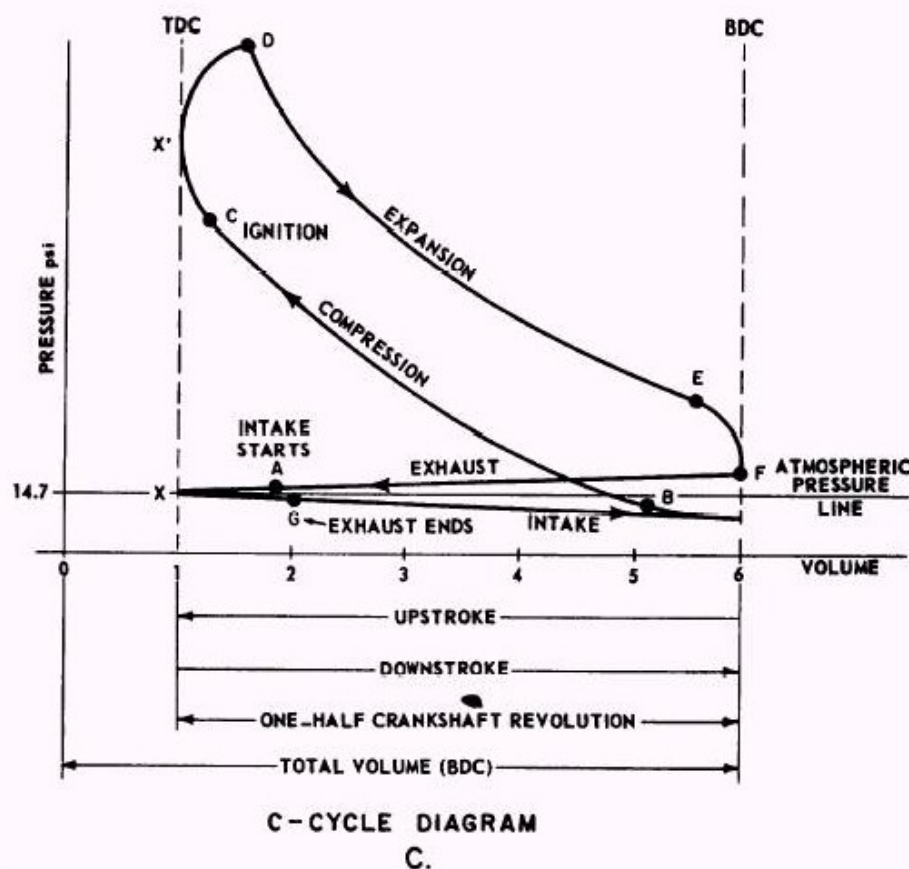


Figure 2-6.—Pressure-volume diagram for an Otto (gasoline) 4-stroke cycle.

Diagramme volume-pression pour un cycle Otto (essence) à 4 temps -

Source : <http://www.tpub.com/engine3/en3-15.htm>

¹³ Le cycle de Stirling est un cycle limité par des lignes isothermes (1-2 et 3-4) et isochores (2-3 et 4-1). L'efficacité énergétique d'un tel cycle de Stirling idéal est celle d'un cycle de Carnot. D'autres modélisations du cycle de Stirling considèrent que la modélisation isotherme d'une partie du cycle est irréaliste et le décrivent comme limité par des lignes adiabatiques (1-2 et 3-4) et isochores (2-3 et 4-1), avec une efficacité énergétique alors différente de celle du cycle de Carnot

¹⁴ <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880002196.pdf>

Selon l'article « Sur la voie d'un véhicule particulier ne consommant que deux litres aux cent km »¹⁵, par Olivier Appert, Annales des mines, mai 2014, 2014-2, PDG IFP Energies nouvelles, on serait donc loin en tout cas des possibilités du moteur à combustion interne, avec plusieurs phases :

- dans un premier temps, grâce au « downsizing », l'accroissement du rapport volumétrique en essence, l'amélioration des performances des systèmes d'injection, celle des commandes de soupapes flexibles, le « thermo-management », la réduction des frottements divers, l'accroissement du nombre de vitesses et leur pilotage, le pilotage du groupe moto-propulseur, et les micro-hybrides simples du type « start and stop »
- puis, dans un second temps, viendraient l'optimisation poussée du rendement moteur, le contrôle dans les phases transitoires, la réduction des pertes, l'optimisation du rendement du moteur.

A terme, cela déboucherait vers un véhicule hybride, puisque, afin de placer le moteur dans une situation optimisée, un moteur électrique pourrait apporter un complément de charge ou stocker l'énergie excédentaire.

Vers 2014, l'article cite une performance de 4,3 litres/100 km en essence (93 gCO₂/km) ou 3,2 litres/100 km (83 gCO₂/km) en diesel pour le segment «A » (entrée de gamme) (Renault Clio ou Peugeot 208). Il estime que 40 à 50 % de réduction des émissions du moteur à combustion interne sont encore possibles au niveau des motorisations.

Si l'on retient à terme 50 % mais un mix plutôt orienté essence, on serait à 2,15 l/100 km, et avec un peu d'allègement du véhicule et d'aérodynamisme, on arriverait à environ 2 litres aux 100 km soit environ 43 gCO₂/km (et encore moins en diesel). L'article ne donne cependant pas de date cible pour cette performance alléchante, ni d'ailleurs de coût additionnel, ce qui limite la portée de cette prédiction.

Les principaux éléments à mettre en œuvre peuvent différer selon qu'on examine les voitures à essence et diesel.

En motorisation essence, en usage moyen thermique, on peut se situer à 20 ou 25 % de rendement moyen. Ce taux peut être porté à 30 % en hybride, et l'on pourrait viser 35 % à terme, équivalent à 2 litres au cent km, en tout cas dans les segments bas.

L'hybridation est intéressante en motorisation essence, car le moteur à essence voit son rendement se dégrader en fonction de la charge.

En motorisation diesel, les possibilités apportées par l'hybridation semblent plus complexes. Le moteur diesel garde en effet son rendement quand la charge varie. Du coup, des progrès semblent plus difficiles pour ce type de motorisation. Elles semblent trop onéreuses dans les segments bas (A et B) où le diesel devrait donc devenir économiquement moins compétitif que l'essence, et même peut-être le segment C. Seules les motorisations des plus gros véhicules des segments D et au-delà pourraient rester pertinentes sur le plan économique en diesel.

En tout cas, le moteur thermique ou hybride ne semble pas avoir dit son dernier mot.

¹⁵ <http://www.cairn.info/revue-realites-industrielles1-2014-2-page-80.html>

2.3.3. Les nouvelles normes d'émission envisagées pour 2025 liées aux économies en carburant

Pour les véhicules VP neufs, les objectifs européens sont de 95 gCO₂/km en 2020, mais tous types de VP confondus (à 95 % de respect en 2020 et 100 % en 2021). Ils pourraient ensuite atteindre 68 gCO₂/km en 2025.

Sur le graphique ci-dessous de l'ICCT (International Council on Clean Transport), on constate aussi les différences entre les coûts estimés et les coûts constatés liés à la réduction des GES¹⁶.

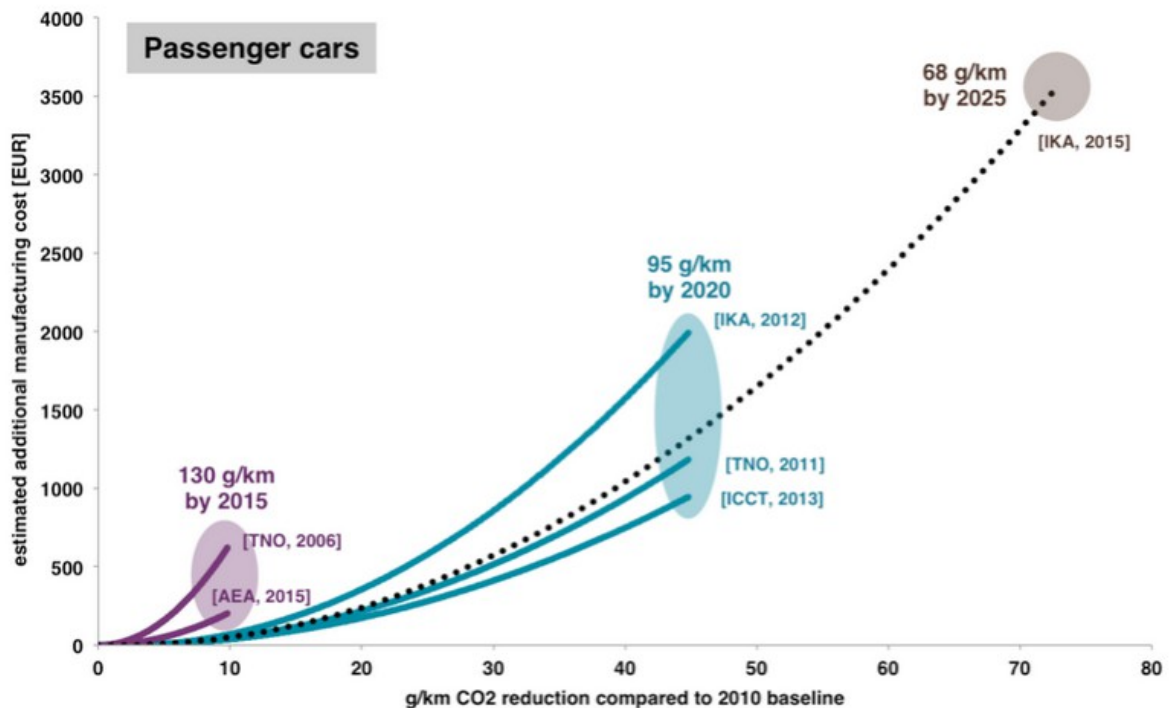


Figure 1: 2015, 2020 and 2025 cost curve estimates for passenger cars in the EU.

Source : ICCT, *vehicle technology costs estimates vs reality*, janvier 2015, <http://www.theicct.org/blogs/staff/vehicle-technology-costs-estimates-vs-reality>

On voit qu'il y a des incertitudes importantes sur les coûts additionnels dans la fixation des normes, et que les constructeurs automobiles semblent souvent moins confiants dans les progrès réalisables à un coût donné que la société civile, malgré une asymétrie d'information technologique qui devrait au contraire jouer en la faveur de leur confiance.

La lecture de la courbe centrale du graphique ci-dessus permet cependant d'inférer pour la dizaine d'années à venir des éléments utiles pour l'évaluation économique de ces progrès dans la motorisation des véhicules.

La réduction d'émissions de CO₂ se traduit aussi pour l'automobiliste en réduction de dépenses de carburants. On raisonne en première approche sans taux d'actualisation, mais avec une estimation très prudente du parcours du véhicule essence dans sa vie soit 100 000 km.

¹⁶ En partant d'une émission de base de 140 gCO₂/km

Si l'on regarde le point de vue de l'automobiliste, si on suppose un prix du super autour de 1,2 euros par litre, celui-ci est gagnant dans tous les cas de figure jusqu'en 2025 et probablement au-delà. Par exemple, il économise 3 896 euros de carburant pour un surcoût initial de 3 300 euros, avec la chute vers 68 gCO₂/km en 2025. Pour lui, les surcoûts à la construction seraient donc largement récupérés dans le cours de la vie du véhicule.

On arrive ainsi à la conclusion que, d'ici 2025 en tout cas, compte tenu du niveau actuel de TICPE (taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques), un automobiliste rationnel devrait se réjouir des normes de CO₂ imposées au VP, voire même devrait exiger leur renforcement, dans une approche « utilitarienne », sans même prendre en compte le sujet du réchauffement climatique.

2.3.4. Un marché des hybrides qui décolle, mais le bilan GES est il vraiment amélioré en circulation réelle ?

Aujourd'hui en 2016, dans certains segments, la presse spécialisée « grand public » commence à recommander les hybrides pour des véhicules roulant principalement en ville (du fait des nombreux ralentissements et démarrages), signe d'un décollage vraisemblable du marché de l'hybride vingt ans après l'introduction de la Prius de Toyota. Elle indique une grande fiabilité, avec des coûts de garantie très faibles (cinq fois moins que pour un modèle thermique du même constructeur dans le cas de Toyota), un fort taux (90%) de satisfaction des taxis, gros rouleurs urbains. Un véhicule d'une flotte autrichienne aurait parcouru 1,2 million de km sans panne.

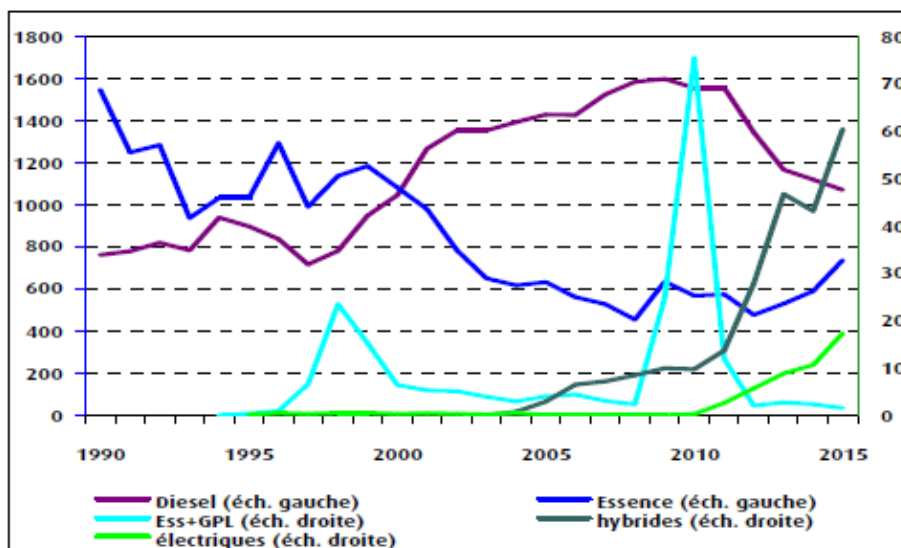
L'entretien serait 40 % moins onéreux qu'un véhicule diesel équivalent du fait de la simplicité de la motorisation et des organes de transmission. Un marché d'occasion commence à apparaître, donnant une possibilité de sortie à coûts raisonnables pour le conducteur souhaitant disposer à tout moment d'un véhicule récent.¹⁷

De ce fait on voit le marché des hybrides commencer à devenir non négligeable à 3,2 %, comme le montre le diagramme suivant (courbe en vert foncé, échelle de droite). Il peut cependant s'agir d'une anticipation de baisse du bonus aux hybrides à essence et la suppression de celui aux hybrides diesel à compter de début 2016. (cf pointe des immatriculations de GPL avant 2010)

¹⁷ Auto Moto, 10 choses à savoir sur la voiture hybride, avril 2016. <http://www.auto-moto.com/actualite/environnement/fonctionnement-voiture-hybride-5-choses-a-savoir-sur-les-voitures-hybrides-57208.htm>

Figure G2-3 Immatriculations annuelles de voitures particulières par motorisation

En milliers



Champ : France métropolitaine.

Source : SOeS

Source : CCTN bilan 2015

Ce qui semble plus inquiétant, c'est que les véhicules dont l'écart entre les émissions de CO₂ aux normes NEDC (Nouveau cycle européen de conduite) et les émissions en circulation réelle semble le plus important, sont les hybrides, avec un écart de l'ordre de 45 % dont environ 10 % de plus que les motorisations traditionnelles autour de 35 % environ en 2014 d'après l'étude « mind the gap 2015 » de « Transport and the environment »¹⁸. Il est difficile d'indiquer quelles peuvent en être les causes précises, on peut se demander si le passage en mode thermique ne serait pas plus fréquent que prévu.

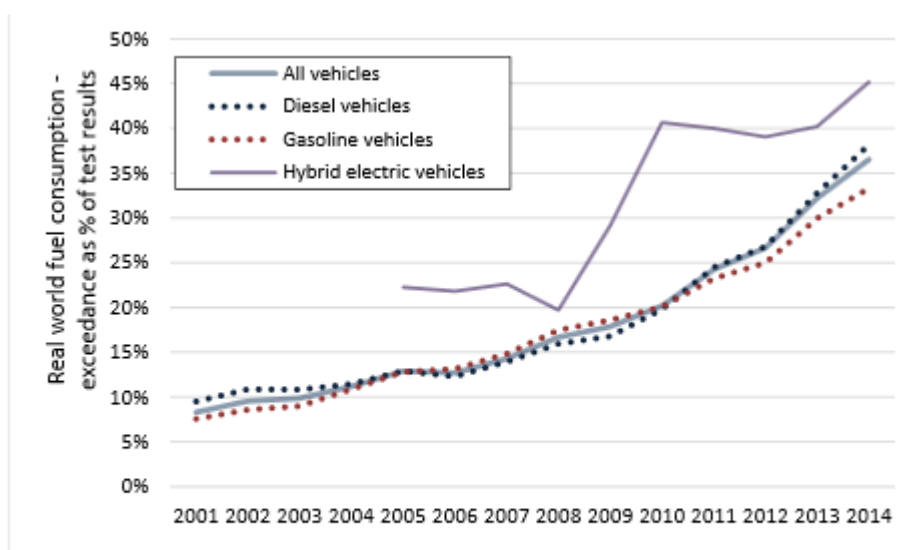


Fig 9: Size of the real-world gap for different engine/fuel types

¹⁸ http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE_Mind_the_Gap_2015_FINAL.pdf

Mind the gap 2015, European federation for Transport and the environment
https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE_Mind_the_Gap_2015_FINAL.pdf

Cela réduirait fortement le gain CO₂ susceptible d'être apporté par les hybrides, ou en augmenterait le coût.

Comme les émissions de CO₂ pour des hybrides non rechargeables sont proportionnelles aux consommations, c'est aussi le modèle économique du propriétaire qui est susceptible d'être remis en cause, sans préjudice des questions d'impact sur les bonus/malus automobiles à l'achat.

À noter aussi que le véhicule hybride se justifie surtout en conduite urbaine, marquée par de fréquentes montées et descentes en vitesse, puisque l'hybridation permet de laisser le moteur tourner dans une zone proche de son optimum. L'intérêt est probablement assez faible en circulation sur autoroute non congestionnée.

Le sujet de l'énergie grise émise lors de la fabrication du véhicule hybride et de son démantèlement devrait également être exploré. Comme il contient une petite batterie, on peut s'attendre à des petites variations par rapport à un moteur non hybride équivalent.

2.3.5. Les véhicules hybrides rechargeables et les véhicules électriques présenteront probablement vers 2025 le plus faible coût sur le cycle de vie pour leur utilisateur

Pour ces véhicules, le choix « spontané » de l'automobiliste rationnel dépend largement du coût des batteries et de leur performance, notamment de leur autonomie.

On peut en effet considérer qu'en première approche il existe un continuum entre véhicules hybrides, hybrides rechargeables et véhicules électriques. Plus le véhicule emporte une grande quantité de stockage d'énergie électrique, plus il coûtera cher à l'achat du fait des batteries, mais moins il coûtera cher en « équivalent carburant » sur sa durée de vie, l'électricité étant vendue moins chère que l'essence ou le gazole par km parcourable.

Un véhicule électrique avec des « petites batteries » peut convenir à un usage de type « quotidien » mais ne permet pas encore des trajets exceptionnellement plus longs, à la différence d'un hybride ou d'un hybride rechargeable. Sauf à accéder sur des autoroutes à des bornes de recharge rapide, mais où le processus peut toutefois durer quand même une heure, ce qui est un inconvénient majeur. De plus, l'inquiétude sur l'autonomie peut s'avérer toutes choses égales d'ailleurs un fort handicap commercial.

On pourrait donc imaginer que le marché se segmente, entre :

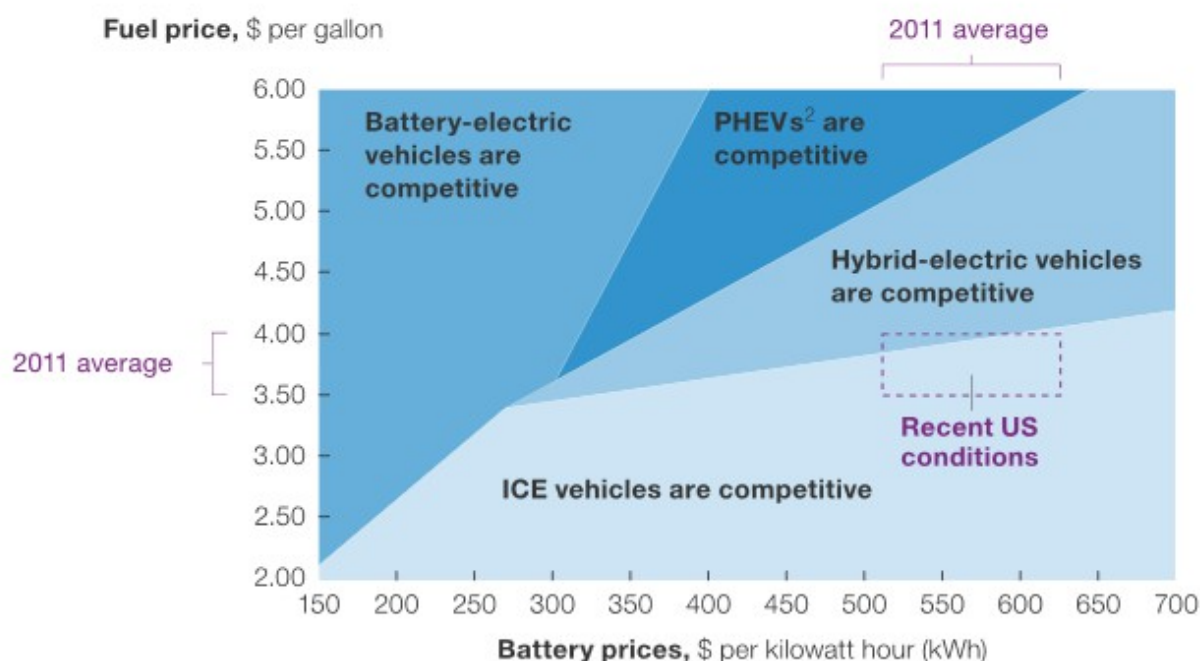
- des véhicules avec des autonomies grandes, adaptées à de longs trajets interurbains, donc des hybrides puis hybrides rechargeables
- des véhicules pour le quotidien, avec une quantité de batterie en rapport avec la longueur des trajets fréquents, qui peuvent donc être facilement électriques

On peut d'ailleurs imaginer une commercialisation de véhicules du quotidien électriques, avec des droits d'usage de véhicules hybrides rechargeables en temps partagé (« time-sharing ») ; ceci dit, il est vraisemblable que la demande pour ce type

de véhicule soit forte pour les congés d'été ou les week-ends, amenant ces loueurs de véhicules à construire des systèmes de prix adaptés à équilibrer l'offre à la demande de véhicules hybrides rechargeables.

La réduction tendancielle du prix des batteries peut mener à un glissement progressif vers les véhicules hybrides rechargeables (PHEV) puis vers les véhicules électriques, comme le montre le graphique suivant, issu d'une étude de 2011 de McKinsey, dans le contexte des États-Unis. Les auteurs y comparent la forme de véhicule la plus intéressante, selon le prix des carburants d'une part et celui des batteries d'autre part.

Electrified vehicles' projected competitiveness with internal-combustion-engine (ICE) vehicles, based on total cost of ownership¹ (US example)



¹Assumes 240 watt hours per mile (as may be achieved with lightweight, efficient air conditioning) compared with today's 305–322 watt hours per mile.

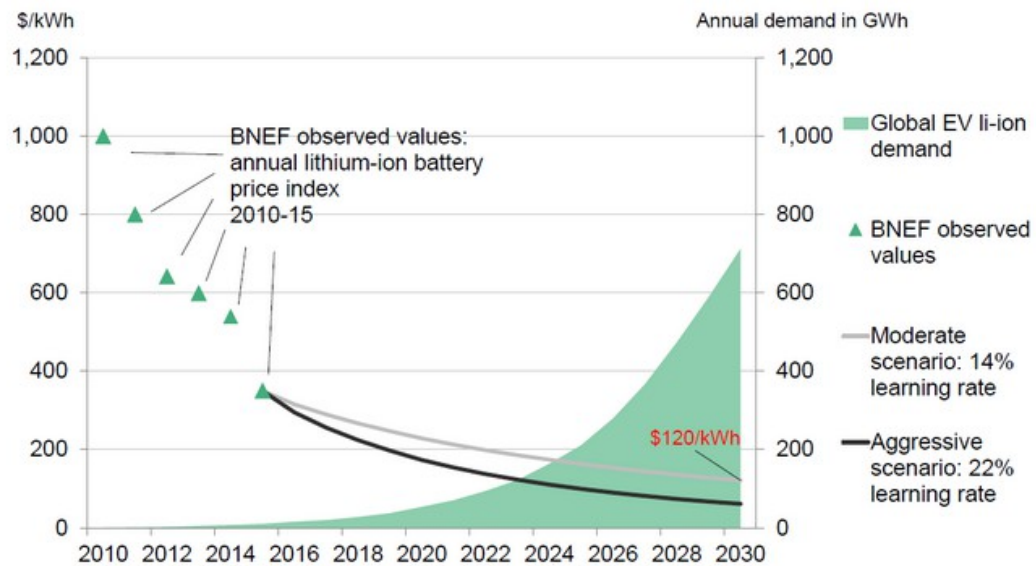
²Plug-in hybrid-electric vehicles.

Source: US Energy Information Administration; McKinsey analysis

Battery technology charges ahead, McKinsey quarterly, juillet 2012

<http://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/battery-technology-charges-ahead>

Les auteurs s'attendent à ce que les prix des batteries (et de leur système de gestion) chute de 500-600 \$ par kWh en 2011 à 200 \$₂₀₁₁ en 2020 et 160 \$₂₀₁₁ vers 2025. Ces réductions de coût seraient atteintes grâce à des effets d'échelle dans la production, des prix plus bas pour les composants, ainsi que des progrès dans les cathodes, les anodes et les électrolytes des batteries, tout en restant, en tout cas d'ici 2025, dans une filière lithium-ion. Les auteurs s'attendent ainsi à un usage important des véhicules électriques, et ce même aux États-Unis.



Source: Bloomberg New Energy Finance Note: these figures are different than those forecast in our 2015 EV battery price outlook. We have updated our forecast battery demand growth figures, which impacts cost.

Évolutions et tendances des coûts des batteries lithium-ion et de la demande issue des véhicules électriques – Source, BNEF,
<http://thinkprogress.org/climate/2016/06/17/3789368/battery-miracle/>

Le graphique ci-dessus de BNEF (Bloomberg new energy finance) confirme la tendance entrevue dans l'étude précédente ; ils rappellent la chute constatée des prix des batteries lithium-ion depuis 1000 \$/kWh vers 2010 à 350 \$/kWh en 2015, et présente deux scénarios (« moderate » et « aggressive ») ; dans les deux cas on voit une prévision de chute des prix importante, vers une fourchette 200-250 \$/kWh en 2020 et 70-120 \$/kWh en 2030. Cette source prévoit par ailleurs une demande en batteries lithium-ion pour véhicules électriques (EV) de 40 GWh en 2020 et 700 GWh en 2030 dans le monde. Pour le véhicule « model 3 », en 2017-18, Tesla vise un coût de moins de 190\$/kWh¹⁹ (pour le pack), indiquant que la baisse des prix serait encore plus importante que prévu.

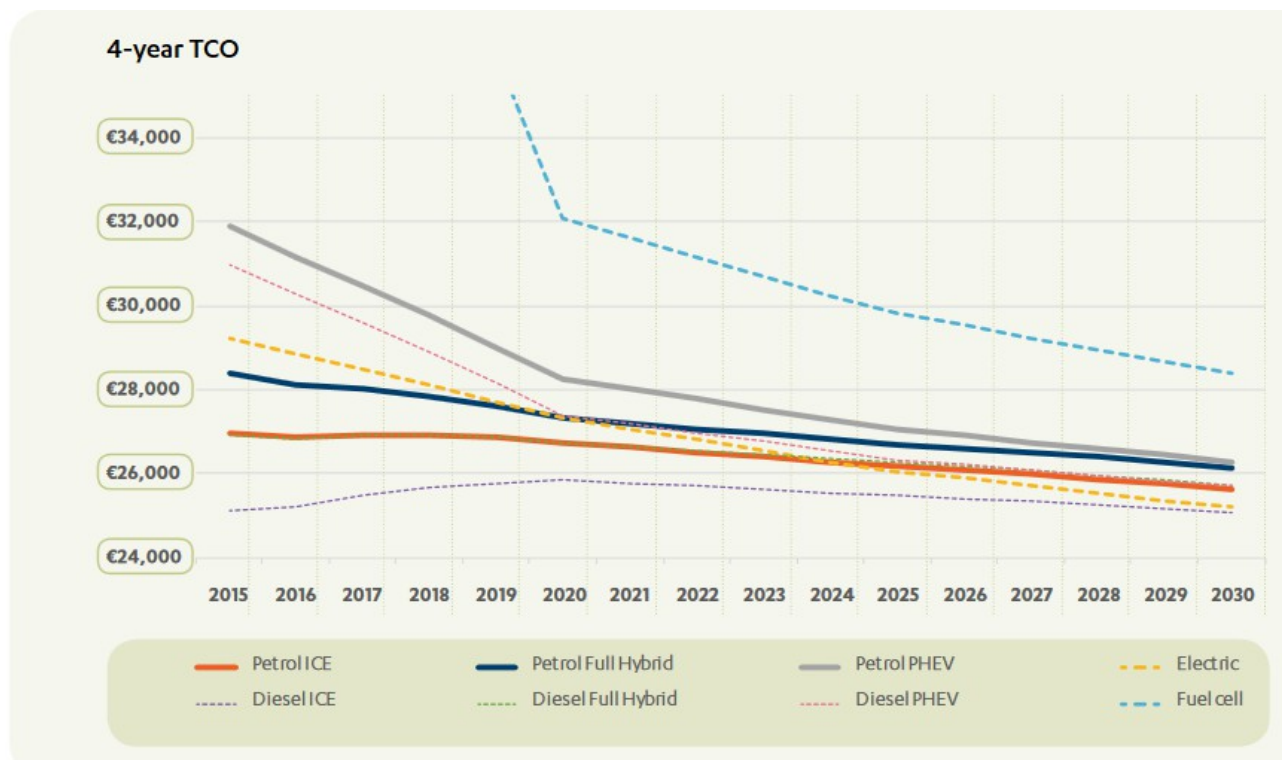
La transition devrait a fortiori être plus importante en Europe, où le carburant est nettement plus taxé. Un prix de 1,2 euros par litre se convertit en 5 dollars par gallon US environ. Si on suppose un prix voisin des batteries en France et en Europe et aux États-Unis, avec les mêmes hypothèses de parcours et de coûts des véhicules, le véhicule électrique serait compétitif dès 350 \$ par kWh et l'électrique rechargeable dès 500 \$ par kWh. L'étude suppose par ailleurs un allègement du véhicule (hors batterie).

Dans une étude sur les véhicules bas carbone dans les années 2020²⁰, le BEUC (bureau européen des unions de consommateurs) estime les coûts totaux de

¹⁹ Source cost is below 190\$/kWh and falling <https://electrek.co/2016/04/26/tesla-model-3-battery-pack-cost-kwh/>

²⁰ BEUC, low carbon cars in the 2020s, http://www.beuc.eu/publications/beuc-x-2016-122_low_carbon_cars_in_the_2020s-brochure.pdf

possession (TCO « total cost of ownership ») sur 4 ans comparés de divers types véhicules en Europe.



Source : BEUC, *low carbon cars in the 2020's., tous véhicules*

Il constate la compétitivité sur le plan du coût de possession des VE dès 2024. Il en conclut qu'il lui paraît raisonnable de viser, en normes NEDC, pour le parc européen, 65 à 70 gCO₂ en 2025 et 40 à 45 gCO₂/km en 2030.

Ces taux globaux pourraient être atteints avec divers hypothèses de mix dans le parc.

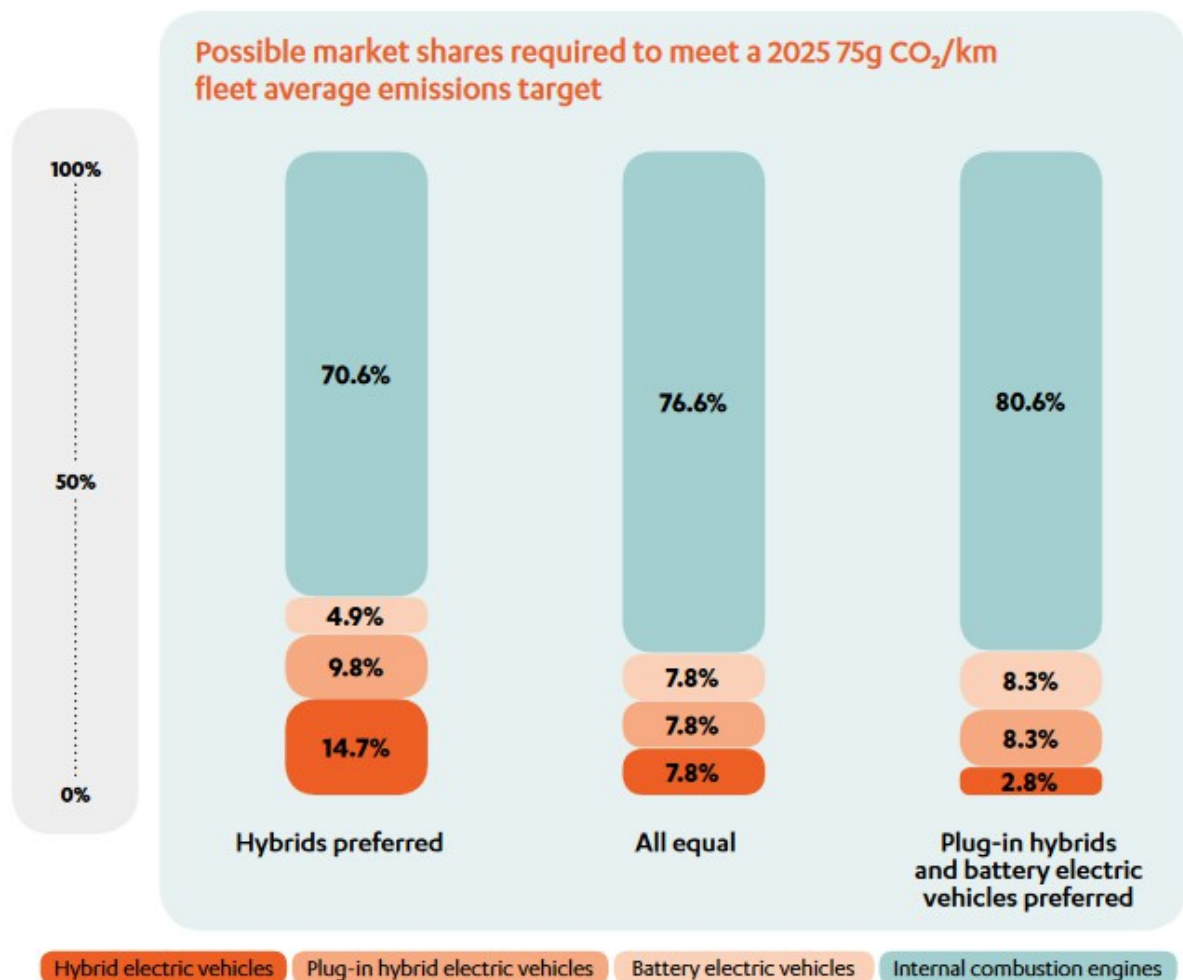


Figure 7: Possible market shares for combustion (ICE), hybrid (HEV), plug in hybrid (PHEV) and battery electric vehicles (BEV) required to meet a 2025 75gCO₂/km WLTP fleet average emissions under different uptake scenarios

Source : BEUC, low carbon cars in the 2020's

Note de lecture : Possibles part de marché pour atteindre une cible de 75 gCO₂/km pour le parc en 2025.

Le cas de la Norvège est intéressant, même s'il ne peut être répliqué à l'identique, notamment du fait des ressources financières hors normes de ce pays.

En 2015, la part de marché des véhicules électriques parmi les ventes de voitures ressort à 17 %, ce qui en fait le leader mondial en part de marché (la Chine étant le leader en volume absolu compte tenu de l'immensité de son marché de véhicules neufs qui dépasse celui des Etats-Unis ou de l'Union européenne).

Au-delà d'un crédit d'impôt, les VE y sont exonérés de TVA (25%) à l'achat.

4000 bornes de recharge seraient installées en ville en 2016. L'installation de concessionnaires de ventes de VE a été facilitée par les pouvoirs publics.

Des autorisations d'emprunt des couloirs bus leur sont accordées, et les parkings et ferries sont gratuits dans la plupart des cas pour ce type de véhicules.

Fort de ces succès, l'État va prochainement revenir progressivement sur les gratuités accordées en matière de taxes d'immatriculation et de circulations pour les VE.

Les autorisations d'emprunt de couloirs bus semblent avoir été, au-delà des incitations financières, la principale cause de la progression des ventes de VE, avec cependant un tel succès que les bus ont parfois été gênés par la densification des couloirs.

Ce qui indique que, autant les incitations financières sont probablement plus difficilement répliquables dans un pays dont les comptes publics sont moins équilibrés (encore qu'une partie de la charge pourrait être mise aux frais des acheteurs des véhicules les plus polluants), le sujet du levier du partage de la voirie et des conditions de stationnement ressort comme essentiel et l'on ne voit pas pourquoi cette partie là du modèle norvégien ne serait pas duplicable, en faisant attention toutefois à ne pas sur-occuper les couloirs bus bien entendu.

Le cas norvégien montre aussi qu'un pays de taille petite ou moyenne peut avoir un marché du VE très développé sans que cela ne pose un problème aux constructeurs.

En Chine, avec une loi « zéro émissions », l'accès pour les véhicules électriques à des voies gratuites, des parkings spéciaux, la non applicabilité de certaines restrictions de circulation, et un système de bonus allant jusqu'à près de 8000 euros a fait décoller (+135 % en 7 mois) les ventes de véhicules électriques, pour en faire en volume depuis 2015 le premier marché du monde pour les véhicules électriques. Il y est prévu de vendre 300 000 VE dès 2016.

Le volume du marché chinois devrait faire baisser les coûts de revient, et par exemple Renault²¹ s'y est fixé un objectif de coût du véhicule électrique à 8000 dollars par unité, hors aides (« without incentives »)²².

Au vu du mix électrique chinois, pour l'instant fortement carboné, l'effet modérateur sur les émissions de GES ne sera probablement pas immédiat mais pourrait constituer une anticipation sur un modèle de production électrique davantage décarboné. En tout cas, pour les autres pays, cela crédibilise les baisses de coûts attendues pour le VE.

Du point de vue des recharges rapides, il y aurait également des progrès technologiques importants. Ainsi l'université de Nanyang (NTU Singapour) aurait récemment mis au point une batterie se chargeant en 2 minutes, en utilisant du Lithium-ion avec des nanotechnologies.

D'autres innovations sont à mentionner : chargement par photosynthèse (bioo), à nanofils (nanowire) présentant 200 000 cycles, au magnésium, « soli-state » de Toyota se chargeant en sept minutes, « porous stainless steel and thin-fil electrolyte » de Toyota avec des charges nécessaires une seule fois par semaine, Graphenano au graphène se chargeant en quelques minutes, avec des micro-super-condensateurs à gravage laser à recharge rapide, au sodium-ion (Rs2E), en 3D, à 3 couches « yolk » du MIT, à l'aluminium graphite se chargeant en quelques minutes, se chargeant avec de l'eau (Fuji Pigment), à chargement par ultrasons (uBeam), aluminium-air avec une autonomie de 1800 km, à la quinone (molécule proche de celle contenue dans la rhubarbe) dont le coût serait particulièrement bas -97 % moins cher- (MIT), au sodium-ion particulièrement abondant, à « nanobatteries » (université du Maryland). Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle montre l'intensité de la recherche et de l'innovation

²¹ EV cars enter China with a price tag of 8000 \$ only, auto world news, 7 novembre 2016 , <http://www.autoworldnews.com/articles/22422/20161107/ev-cars-enters-china-price-tag-8-000.htm>

²² Renault eyes 8000 \$ electric car for China, Reuters, novembre 2016, <http://www.reuters.com/article/us-renault-china-car-idUSKBN12Y15J>

dans les batteries, tirée par le smartphone et la voiture électrique. Toutes ces idées n'atteindront probablement le stade de la commercialisation, mais il serait étonnant qu'il n'y ait pas de grands progrès en la matière ces prochaines années. Au panorama s'ajoute la recherche d'économies d'échelle, telle que dans l'usine gigantesque « Gigafactory » de Tesla au Nevada.²³

Cette nouvelle donne crédibilise très fortement le potentiel du véhicule électrique pour son utilisateur rationnel. Si les batteries ne coûtent plus cher, le marché des hybrides pourrait être d'assez courte durée, ou limité à des segments ayant besoin de très longues autonomies comme les véhicules destinés à un usage interurbain significatif, pour autant qu'il n'y ait pas de révolution dans les durées de recharge.

2.3.6. Des risques sur l'approvisionnement en minéraux critiques comme le lithium et le néodyme

Si le véhicule électrique, rechargeable ou non, paraît intéressant pour son utilisateur, on doit vérifier, dans une approche de type cycle de vie et empreinte mondiale, qu'il peut contribuer à une réduction forte des GES. Deux conditions sont nécessaires à cet effet :

- il faut qu'il n'y ait pas de limites substantielles au développement du nombre de véhicules, provenant par exemple de limites sur les matériaux, ou bien d'autres limites environnementales
- il faut aussi que le bilan unitaire sur cycle de vie du véhicule soit positif du point de vue GES

Pour ce qui concerne la première condition, la première question qui vient à l'esprit est celle de la disponibilité des matériaux pour les batteries et les moteurs électriques, et ce à grande échelle, au plan mondial.

Le UKERC (UK energy research centre) estime en 2013 le besoin en lithium pour les batteries des véhicules électriques en 2050 à 184 000 à 989 000 tonnes, sur la base d'un ratio de 190 à 380 grammes de lithium par kWh. Ce qui ferait 540 % à 2 900 % de plus qu'en 2011.

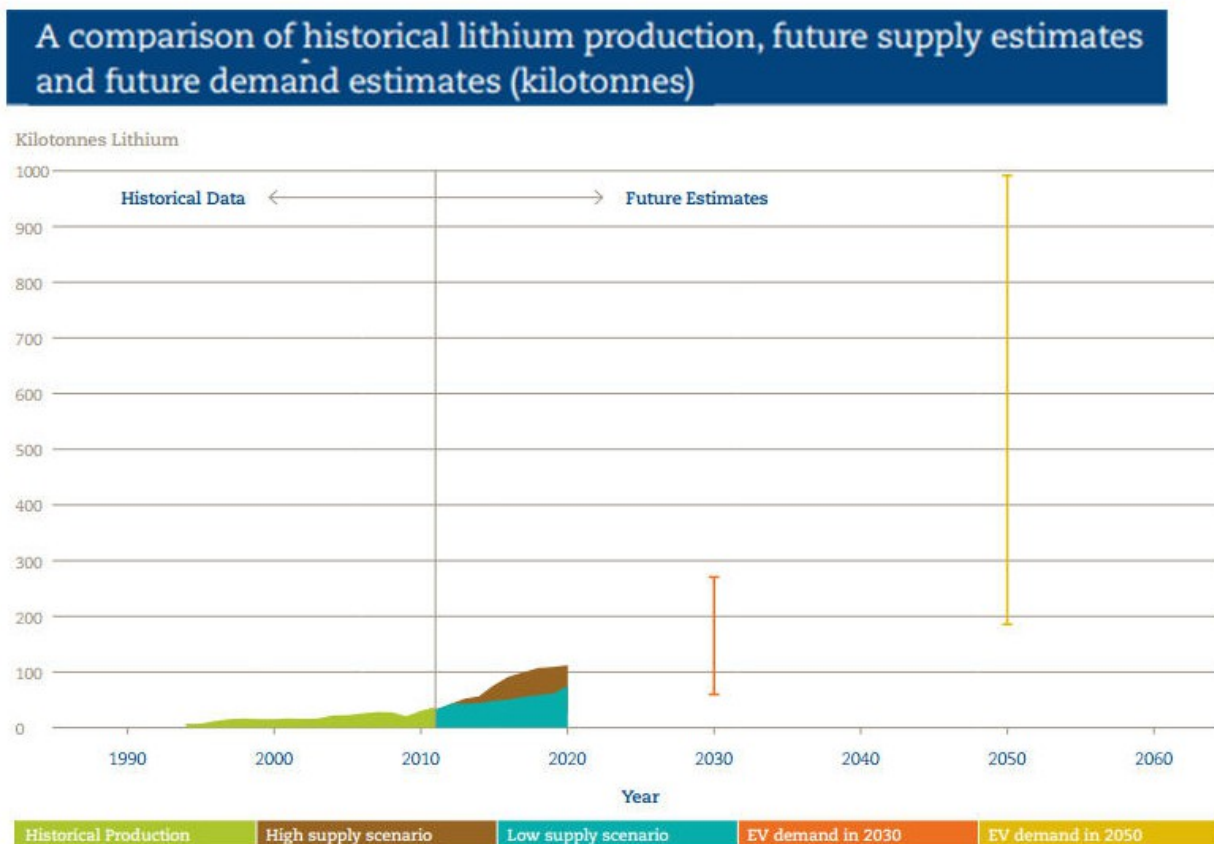
La production de métal lithium serait de 34 000 tonnes en 2011, et les réserves s'élèveraient à 13 millions de tonnes d'après l'USGS (US geological Survey), mais certains gisements peuvent présenter des coûts d'extraction très importants.

La terre rare néodyme serait également critique pour les moteurs électriques. Le besoin en néodyme pour les véhicules à moteur électrique serait compris entre 15 000 et 111 000 tonnes en 2050, sur la base d'un ratio de 1 à 3,6 kg de matériau magnétique par véhicule, besoin auquel il faudrait ajouter de 600 à 6 000 tonnes pour les éoliennes. Ce qui représentait 80 % à 600 % fois plus qu'en 2011.

La production de néodyme serait d'après l'UKERC de 17 000 tonnes en 2010 et les réserves seraient à 13 millions de tonnes, mais là encore avec d'importantes incertitudes.

²³ Future batteries, coming soon : charge in seconds, lasts months and power over the air, Pocket-Lint mai 2016 <http://www.pocket-lint.com/news/130380-future-batteries-coming-soon-charge-in-seconds-last-months-and-power-over-the-air>

Le rapport de l'UKERC indique donc que le manque de données crée une incertitude sur les scénarios de décarbonation. Il recommande la mise en place de filières de recyclage de ces deux éléments, tout en rappelant qu'il pourra exister des alternatives au lithium et au néodyme. Globalement, il conclut à l'existence de risques mais pas d'une impossibilité « per se ».

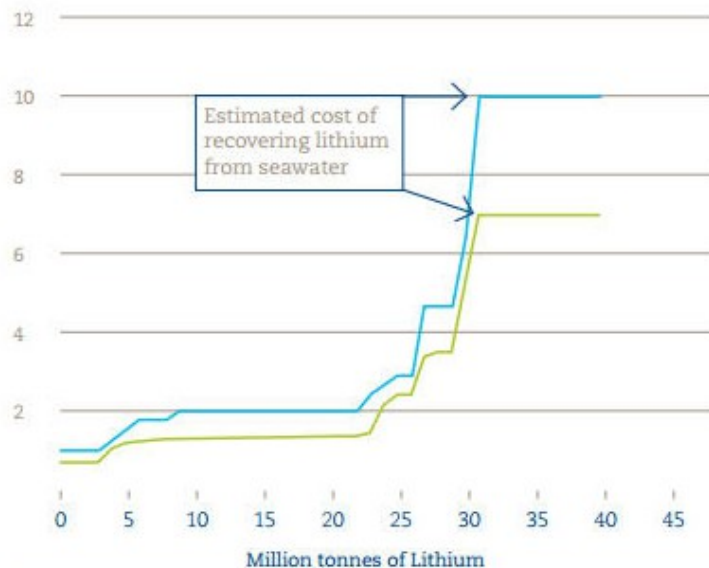


Source: UKERC

Production de lithium - Source :Materials availability : potential constraints to the future low carbon economy, WP2 batteries magnets and materials, UKERC, 1^{er} avril 2013 <http://www.ukerc.ac.uk/publications/materials-availability-potential-constraints-to-the-future-lowcarbon-economy-working-paper-ii-batteries-magnets-and-materials.html>

Cumulative availability curve for lithium carbonate

\$/lb of Lithium Carbonate



Source: Adapted from Yaksic and Tilton (2009)

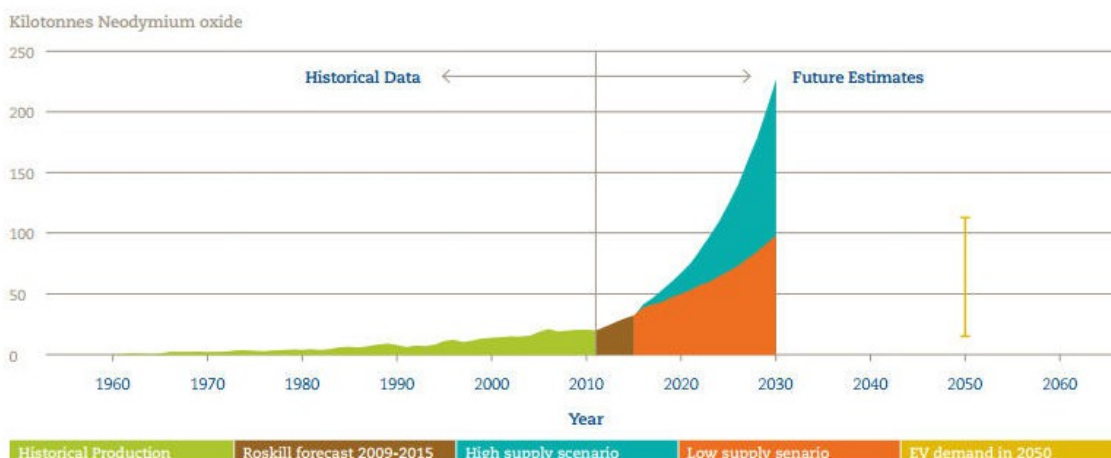
High cost scenario

Low cost scenario

Source: UKERC

Éléments de coût pour le lithium - Source : Materials availability : potential constraints to the future low carbon economy, WP2 batteries magnets and materials, UKERC, 1^{er} avril 2013 <http://www.ukerc.ac.uk/publications/materials-availability-potential-constraints-to-the-future-lowcarbon-economy-working-paper-ii-batteries-magnets-and-materials.html>

A comparison of historical neodymium oxide production, future supply estimates and future demand estimates (kilotonnes)



Source: UKERC

Production de néodyme - Source : Materials availability : potential constraints to the future low carbon economy, WP2 batteries magnets and materials, UKERC, 1^{er} avril 2013 <http://www.ukerc.ac.uk/publications/materials-availability-potential-constraints-to-the-future-lowcarbon-economy-working-paper-ii-batteries-magnets-and-materials.html>

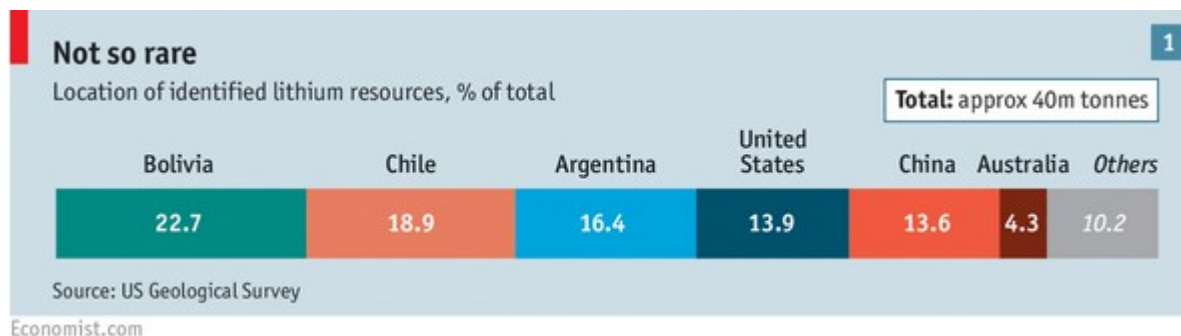
Un article plus récent de 2016²⁴ montre que le prix « spot » du lithium a fortement décollé à la fin de 2015, ce qui illustre ces inquiétudes. Il pointe aussi la concentration industrielle forte du marché de la production du lithium, dans les mains de 4 grandes entreprises Albermarle, SQM, FMC, Tianqi. Une part importante du chilien SQM aurait été achetée récemment par une entreprise chinoise dans le but de s'assurer une visibilité sur l'approvisionnement de ce matériau devenu critique.



Economist.com

²⁴ The economist, an increasing precious metal, 16 janvier 2016 <http://www.economist.com/news/business/21688386-amid-surge-demand-rechargeable-batteries-companies-are-scrambling-supplies>

Source : *The economist, an increasing precious metal*, 16 janvier 2016
<http://www.economist.com/news/business/21688386-amid-surge-demand-rechargeable-batteries-companies-are-scrambling-supplies>



Source: *The economist, an increasing precious metal*, 16 janvier 2016
<http://www.economist.com/news/business/21688386-amid-surge-demand-rechargeable-batteries-companies-are-scrambling-supplies>

2.3.7. Le véhicule électrique présente d'autres risques pour l'environnement

Au-delà des problèmes de risques de pénuries de matériaux, il convient de mentionner également des risques environnementaux spécifiques aux véhicules électriques, notamment dans les domaines suivants : toxicité pour les humains (H TP) (batterie), toxicité pour l'eau (FETP) (batterie), eutrophisation de l'eau (FEP) (batterie).

Les véhicules électriques y sont distingués selon le type de batterie (Li-NCM ou Li-FePO₄) d'une part, et pour le Lithium-NCM selon la source énergétique pour la production de l'électricité (mix européen Euro (pas le mix français) , gaz naturel NG, ou charbon G).

Le tableau ci-dessous donne une idée de comment le véhicule électrique se compare à des véhicules à combustion interne (ICEV) diesel D ou essence G. (pas dans le mix français)

Le sujet spécifique GES (« GWP » ici) est discuté plus précisément dans le chapitre suivant.

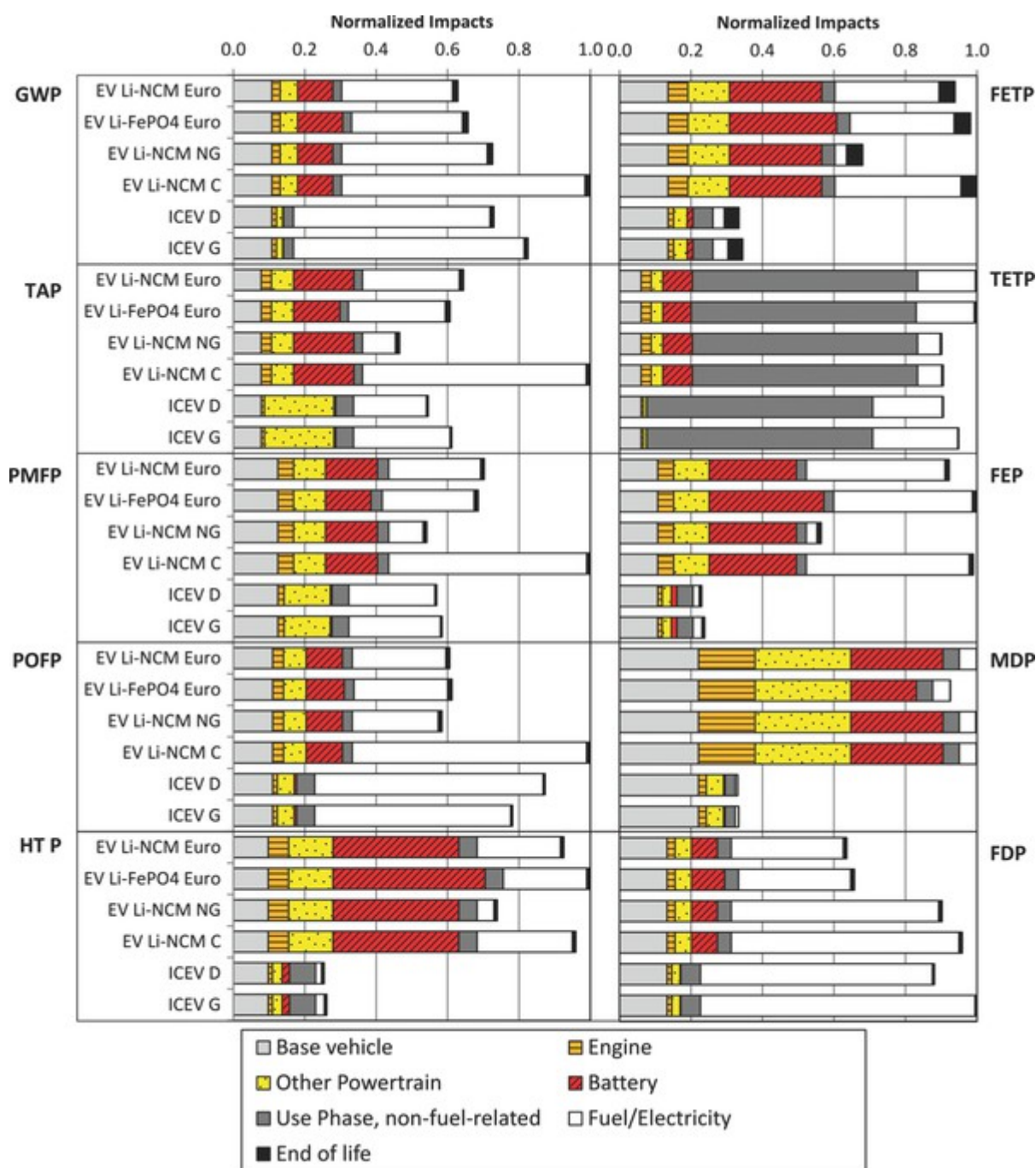


Figure 1. Normalized impacts of vehicle production. Results for each impact category have been normalized to the largest total impact. Global warming (GWP), terrestrial acidification (TAP), particulate matter formation (PMFP), photochemical oxidation formation (POFP), human toxicity (HTP), freshwater eco-toxicity (FETP), terrestrial eco-toxicity (TETP), freshwater eutrophication (FEP), mineral resource depletion (MDP), fossil resource depletion (FDP), internal combustion engine vehicle (ICEV), electric vehicle (EV), lithium iron phosphate (LiFePO₄), lithium nickel cobalt manganese (LiNCM), coal (C), natural gas (NG), European electricity mix (Euro).

Source : Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G. and Strømman, A. H. (2013), *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*. *Journal of Industrial Ecology*, 17: 53–64.

Ces analyses ne valent cependant pas pour le contexte français, dont le mix est comparativement très décarboné, et donc il est procédé plus loin à des estimations de résultats pour la partie GES afin de tenir compte du mix français.

Mais elles sont intéressantes en revanche pour ce qui concerne les bilans sur les autres risques environnementaux, si on suppose des méthodes de production analogues.

2.3.8. Le contexte d'un mix électrique européen moins décarboné que le mix français rend le véhicule électrique néanmoins intéressant, et l'importance de différer la charge dans la nuit grâce à une tarification temporelle

Comme indiqué dans les éléments de méthode indiqués ci-dessus, il convient d'examiner la seconde condition nécessaire à savoir que le bilan GES du véhicule électrique soit bon sur le cycle de vie, en tenant compte de toute son empreinte GES mondiale.

Une première approche possible consiste à faire une hypothèse de production d'électricité provenant d'une seule source. C'est ce que fait l'étude de Hawkins et al. citée précédemment, où l'on voit que le bilan GES serait détérioré si le mix électrique provient du charbon, et serait proche de celui des véhicules thermiques diesel si l'électricité provient du gaz naturel.

Le mix électrique européen varie très significativement d'un pays à l'autre. La France est caractérisée par un mix électrique déjà largement décarboné à plus de 90 % (2012) comportant une très grande part de nucléaire, ainsi que de l'hydraulique.

Ceci dit, le marché électrique ouest-européen (sans l'Espagne ni la Grande-Bretagne) est interconnecté, et on peut a priori se demander si le mix électrique français dans ce contexte doit être retenu ou pas.

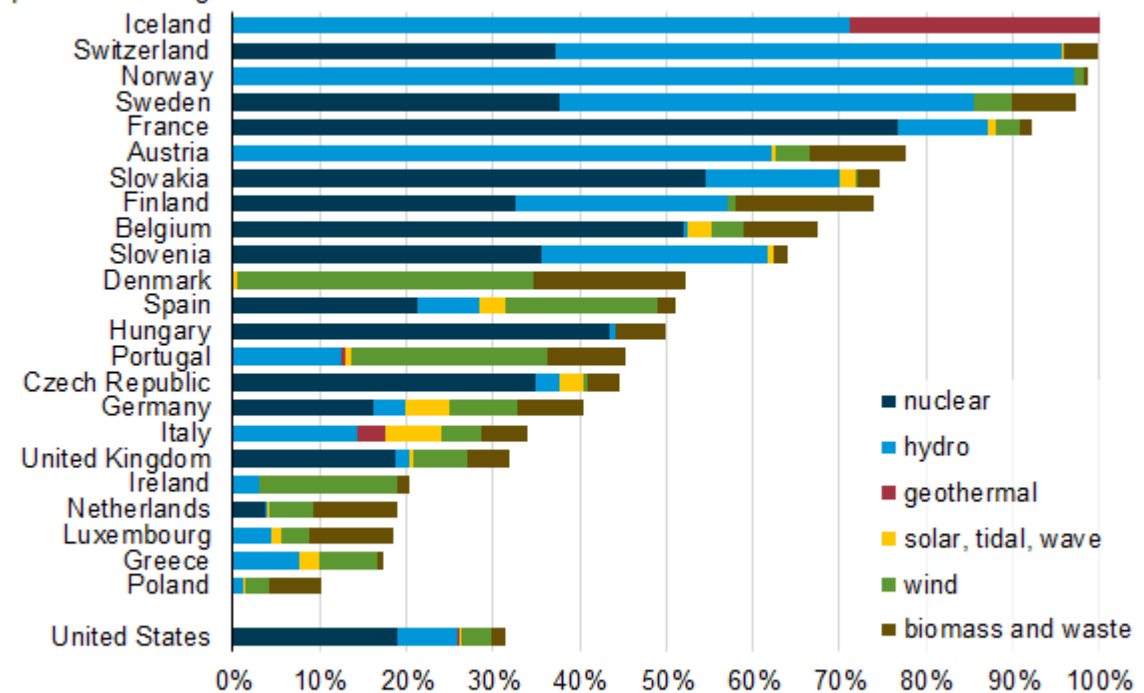
Ainsi, le mix allemand ne contient par exemple que 40 % d'électricité non carbonée, le mix italien moins de 35 %, et le mix néerlandais moins de 20 %. La Belgique dépasse 65 %, l'Autriche 75% et la Suisse atteint quasiment 100 %.

Par contre la France affiche un solde physique exportateur avec tous ses voisins, et un solde contractuel importateur uniquement avec l'Allemagne, de seulement 5 TWh.

Il semble que l'on ne sache pas exactement quel est le taux d'électricité carbonée dans ce qui est importé en France. Une partie peut être liée à une production liée à des énergies fossiles pour assurer l'alimentation en cas de pointe de la différence demande-offre, mais il peut y avoir des importations liées à un « trop plein » d'énergie solaire (ou éolienne) à certaines heures par exemple en Allemagne.

Il serait donc utile de mieux connaître le contenu en carbone des importations et exportations d'électricité.

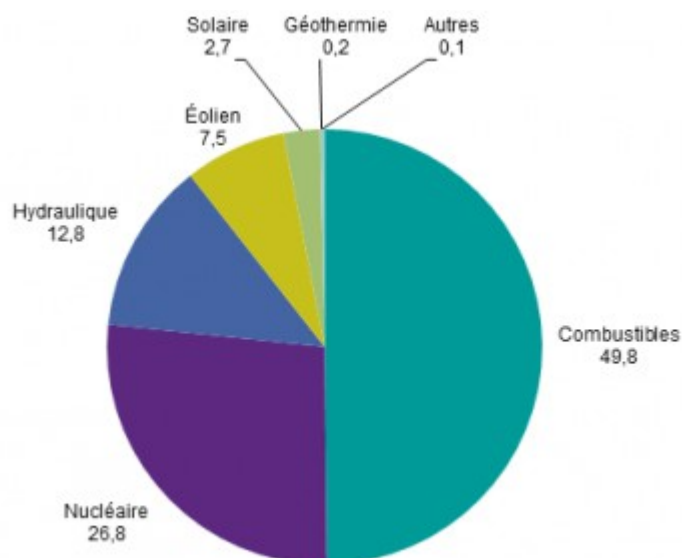
No-carbon electricity generation share in Europe and the United States (2012) percent of total generation



Source: U.S. Energy Information Administration, *International Energy Statistics*

Principal contributors: Brian Murphy, Alex Abramowitz

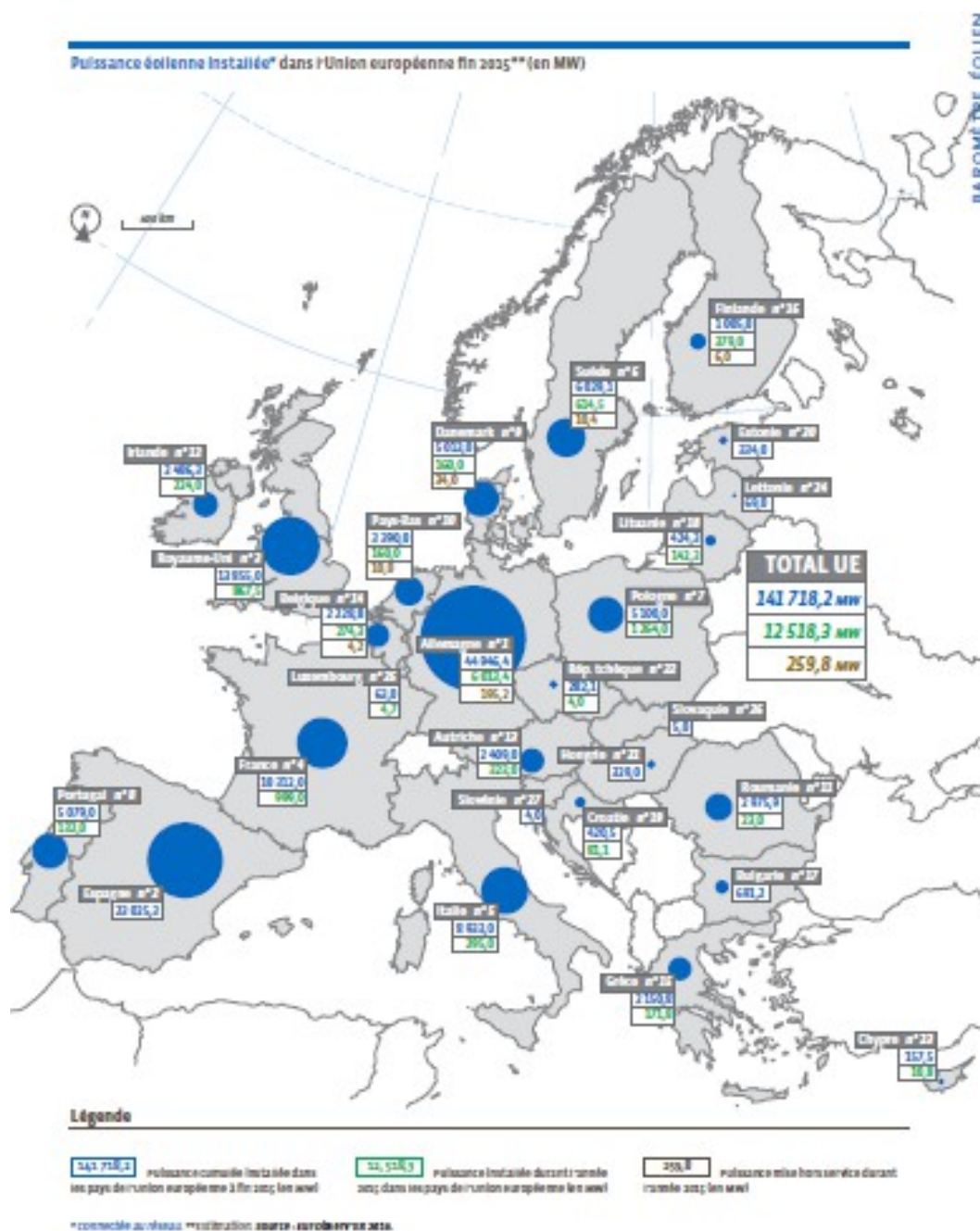
Source: <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=18071>



Mix européen (génération nette) par GWh en 2013 EU-28

http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Net_electricity_generation_EU-28_2013_%281%29_%28%25_of_total_based_on_GWh%29_YB15-fr.png

La distribution géographique des sources d'énergies est aussi disponible.



Légende

141 718,2 Puissance cumulée installée dans les pays de l'Union européenne à fin 2015 (en MW)

12 518,3 Puissance installée durant l'année 2015 dans les pays de l'Union européenne (en MW)

259,8 Puissance mise hors service durant l'année 2015 (en MW)

* Connectée au réseau. ** Estimation. Source : Eurobserv'ER 2016.

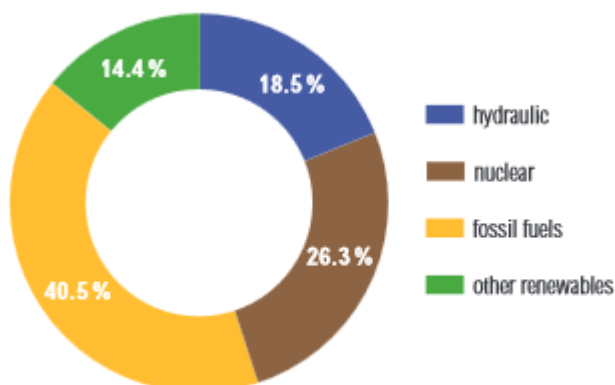
Source Eurobserv'er wind energy barometer 2016, <http://www.eurobserv-er.org/category/all-wind-energy-barometers/>

L'Allemagne apparaît comme le pays ayant de loin la plus grande puissance éolienne installée en Europe.

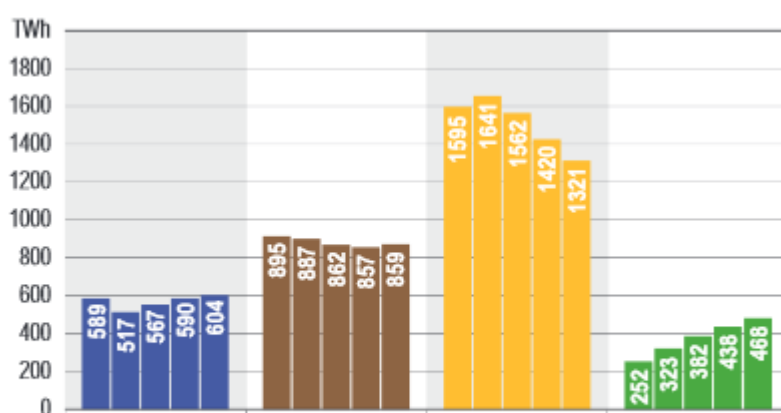


Source :ENTSOE Electricity in Europe 2014, http://www.rte-france.com/sites/default/files/entsoe_electricity_in_europe_2014.pdf

L'Allemagne est également le pays qui dispose de la plus grande puissance solaire thermique installée.



Energy net generation in 2014



Energy net generation from 2010 to 2014 in TWh

ENTSOE Electricity in Europe 2014, http://www.rte-france.com/sites/default/files/entsoe_electricity_in_europe_2014.pdf

L'ADEME a réalisé une étude intitulée « ELABORATION SELON LES PRINCIPES DES ACV DES BILANS ENERGETIQUES, DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET DES AUTRES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX INDUITS PAR L'ENSEMBLE DES FILIERES DE VEHICULES ELECTRIQUES ET DE VEHICULES THERMIQUES, VP DE SEGMENT B (CITADINE POLYVALENTE) ET VUL A L'HORIZON 2012 ET 2020 » en matière de comparaison sur un cycle de vie²⁵.

Elle se base essentiellement sur le mix énergétique français. Comme on ne connaît pas le contenu en carbone du solde export-import, de surcroît aux heures où la puissance appelée par les véhicules électriques est la plus élevée, il paraît utile à titre de sensibilité d'examiner si ces résultats sont globalement corroborés par une hypothèse de mix électrique un peu moins carboné.

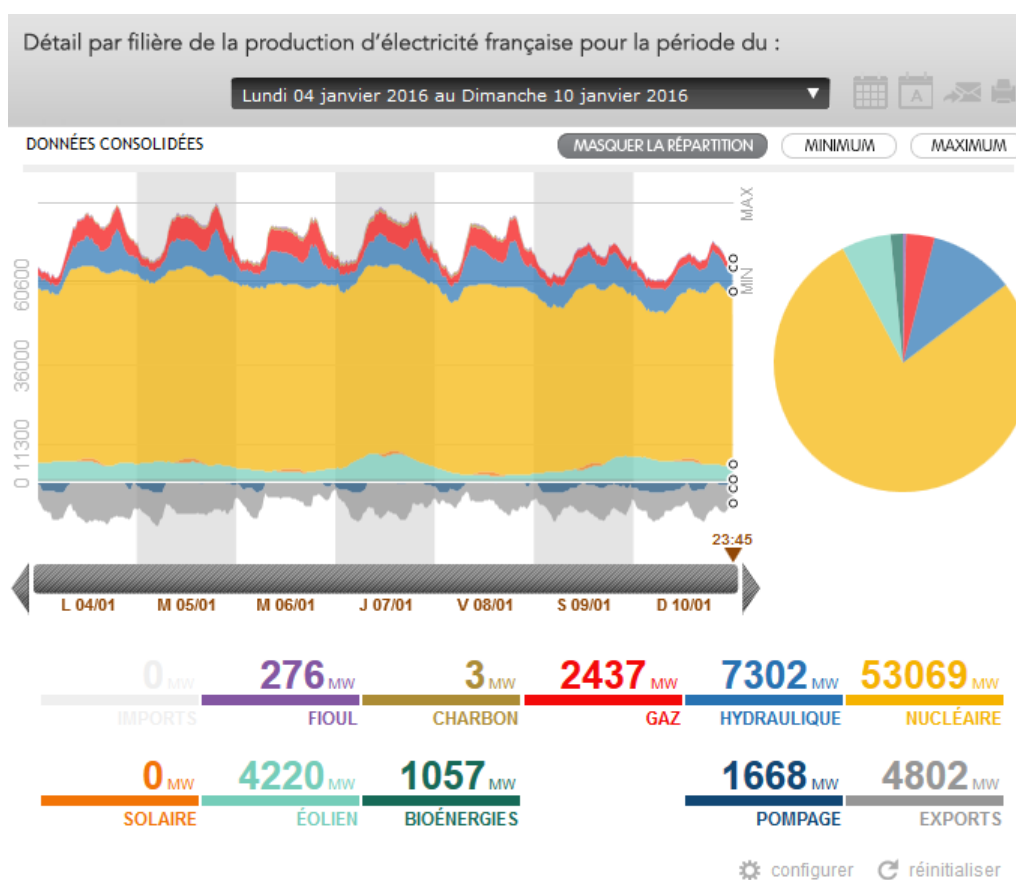
²⁵ Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de GES et d'autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020

, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf

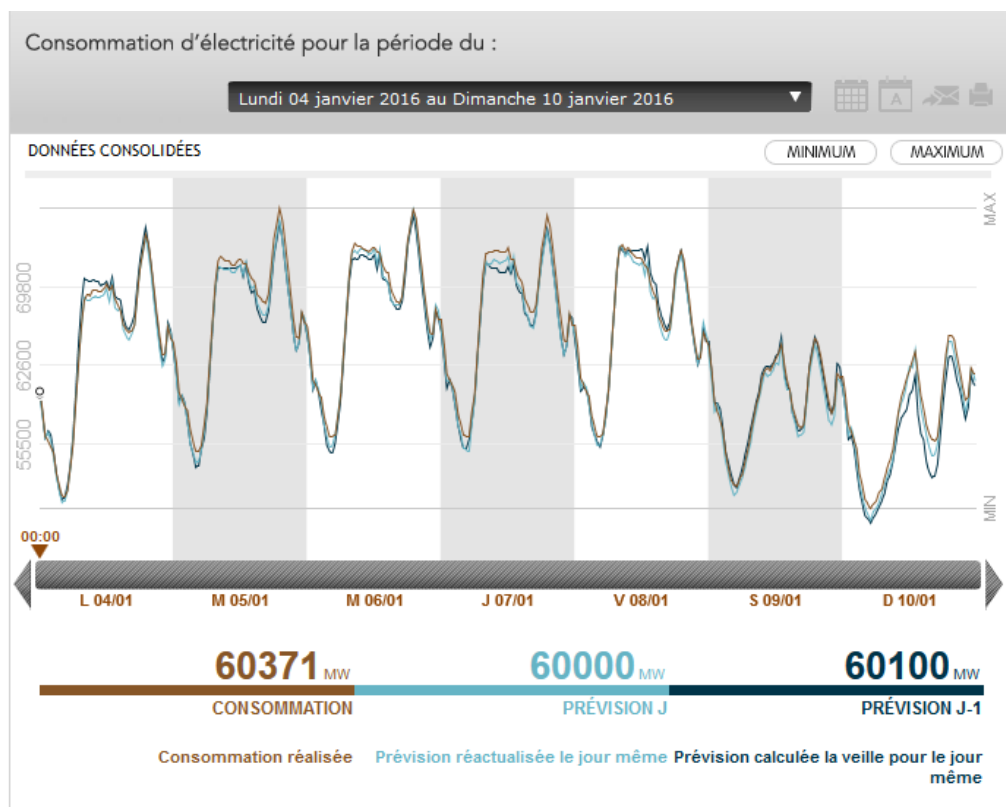
Si c'est le cas, le test de sensibilité est utile pour valider la robustesse des résultats.

On trouve aussi des informations sur le mix énergétique à la production, complété par le pompage hydraulique et le solde import/export dans le bilan de RTE, par exemple ci-après le profil de la première semaine de janvier 2016. Malheureusement, la seule information de solde import export ne permet pas d'estimer heure par heure le contenu carbone des importations d'électricité.,

On voit cependant que la pointe de production se situe en semaine, le soir vers 19h environ, et à un moindre degré vers 12h, et le creux dans la nuit vers 5h environ. Certains jours présentent des pointes plus marquées (notamment les jours froids en hiver) et l'on constate également le caractère intermittent des renouvelables tel que l'éolien ou le solaire.

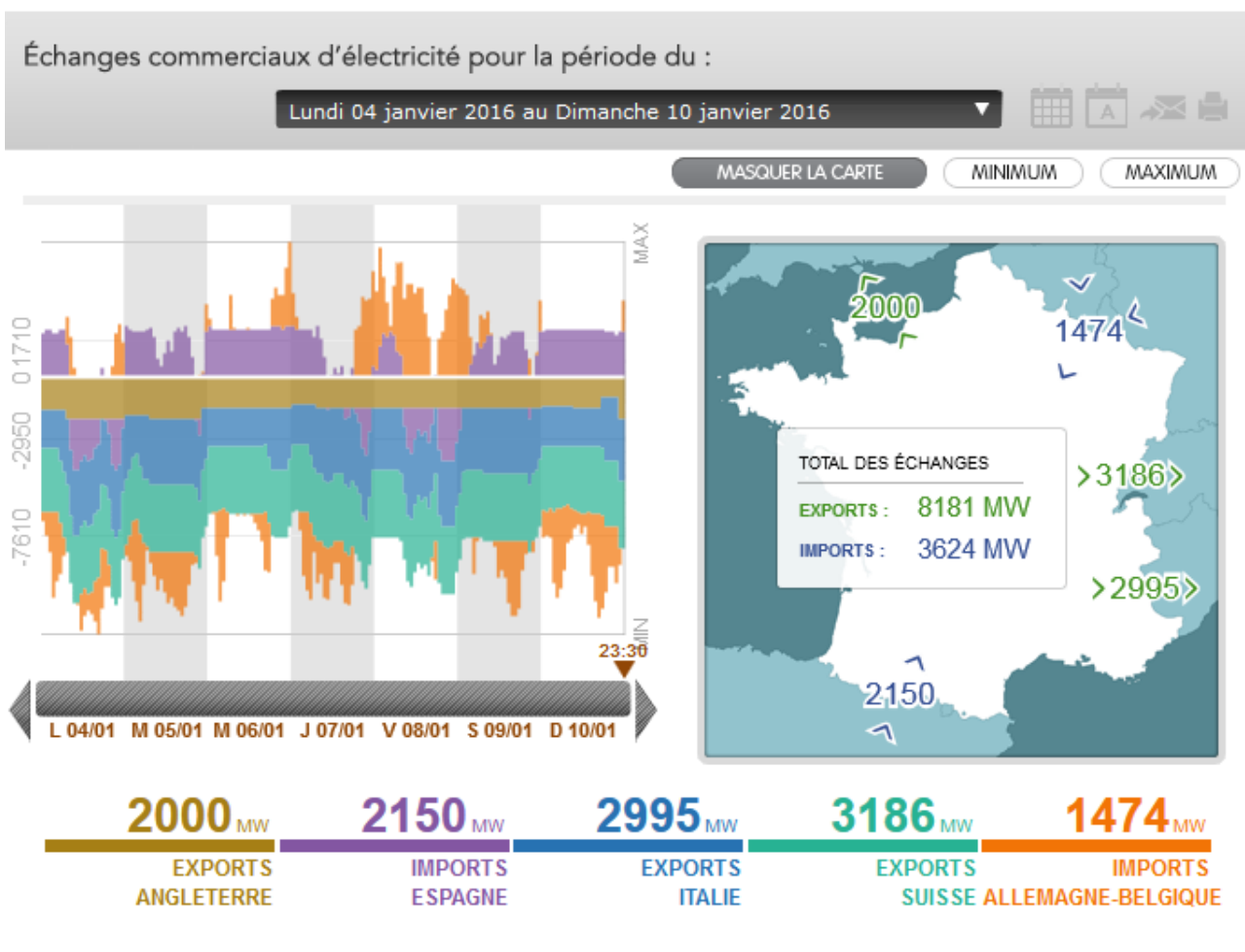


Source: <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>



Source: <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-consommation>

A défaut d'informations sur les importations et exportations par énergie primaire, on dispose de données sur leur temporalité dans cette même semaine. On voit que le vendredi 8 janvier 2016, jour sans vent, et à un moindre degré le mercredi 6 janvier 2016 avec peu de vent est marqué par des fortes importations en provenance d'Allemagne et de Belgique.



Source: <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-echanges-commerciaux>

Ce qui importe pour le véhicule électrique n'est pas forcément le mix moyen mais celui de l'électricité appelée à chaque moment. Son contenu en carbone est susceptible de varier dans le cours de la journée, selon les saisons, et selon qu'il fait jour ou pas, et selon qu'il fait beau pour le solaire et qu'il y a du vent ou pas. On peut noter que la possibilité d'appeler de la puissance pendant des périodes plutôt creuses, grâce au stockage de la batterie (la nuit à domicile, le jour au bureau) doit permettre en nuit d'appeler soit du vent s'il souffle, soit du nucléaire, et en journée souvent du solaire.

De ce point de vue, si l'on retient en France un branchement par le conducteur du véhicule au retour à domicile aura lieu le soir vers 19h environ et un débranchement au départ le matin vers 8h environ, on voit qu'il est important pour le bilan carbone que le chargement soit différé après environ minuit, après la pointe, pour s'assurer qu'on n'appelle pas une électricité carbonée pour l'essentiel, même si elle est produite chez l'un de nos voisins, ce qui ne fait pas sens pour un problème d'ampleur non pas locale mais planétaire. Et ce surtout pour un jour sans vent comme le vendredi dans l'exemple de la semaine citée ci-dessus.

De ce point de vue, un système « smart grid » paraît utile, pour déclencher un appel de puissance à des heures de fort taux d'électricité décarbonée, donc en général de nuit, entre minuit et 6h, durée qui est en gros compatible avec une charge de batterie. Si l'on veut que l'utilisateur final en tienne compte, une tarification au moins un peu

modulée paraît indispensable pour l'encourager à appeler cette puissance au bon moment, compte tenu du mix. Il faut que cette modulation soit suffisante pour modifier le comportement de l'utilisateur, mais l'amplitude de modulation tarifaire n'est pas nécessairement égale à celle des dommages économiques. L'intelligence du « smart grid » n'a pas non plus besoin d'être très importante, il suffit d'envoyer un signal adéquat pour indiquer qu'on peut charger les équipements décalables dans le temps (voiture électrique, chauffe-eau à accumulation, peut-être machines à laver,...). Il est cependant clair que si cette approche de charge de nuit se généralise, la pointe peut se déplacer et le calcul est à actualiser.²⁶

2.3.9. Le véhicule électrique et le véhicule hybride rechargeable ne sont intéressants sur le plan GES que si l'électricité est largement décarbonée, ce qui est le cas aujourd'hui en France

Une étude récente du NREL²⁷ examine l'impact du mix électrique, de la disponibilité des infrastructures de recharge et des types de véhicule sur les émissions de GES associées à la charge des véhicules électriques.

Deux véhicules, PHEV (électrique rechargeable) et BEV (électrique) sont comparés à un véhicule conventionnel CV.

Des mix énergétiques sont définis comme ci-dessous.

²⁶ A très gros traits et à titre d'exemple, si l'on a par exemple 3 M de VE (10 % du parc) avec une batterie de 40 kWh chacun, alors ce sont 120 GWh à fournir chaque nuit et 43 TWh par an, ce qui commence à être discernable, approchant 10 % de la consommation électrique française.

²⁷ NREL National Renewable Energy Laboratory, emissions associated with electric vehicle charging, impact of electricity generation mix, charging infrastructure availability and vehicle type, Joyce McLaren et alii, avril 2016

http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ev_emissions_impact.pdf

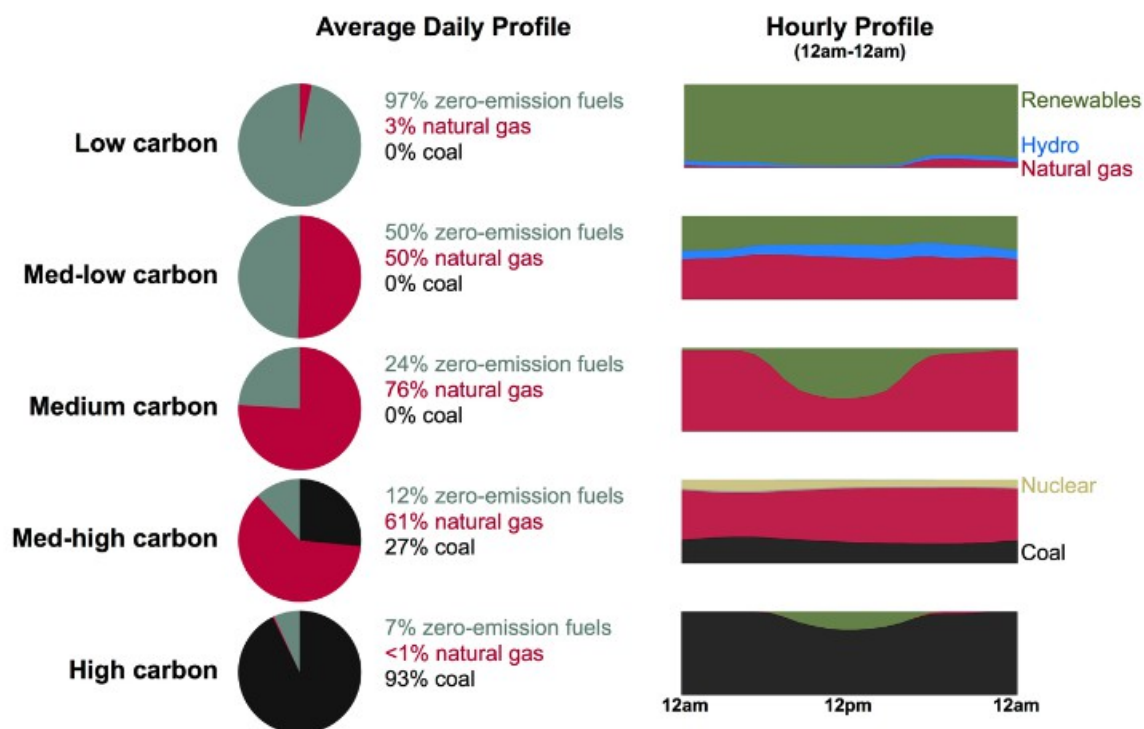


Figure 2. Modeled grid profiles representing varying levels of carbon intensity

Source: Brinkman (2015)

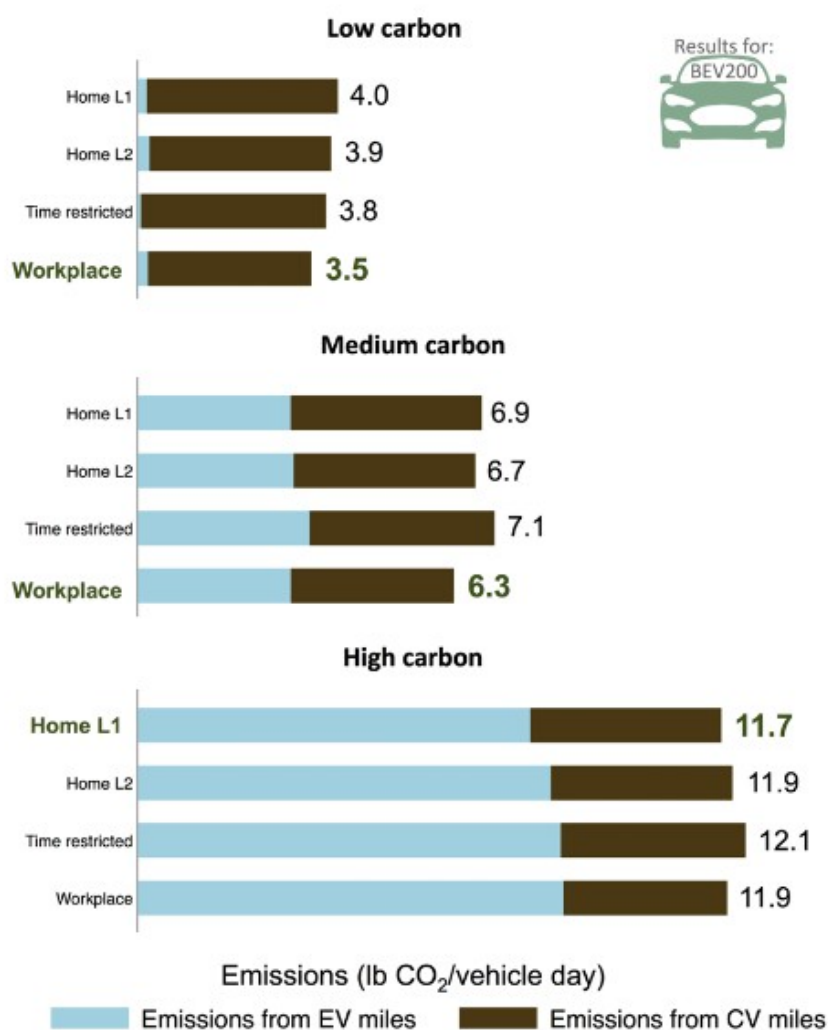
Source :NREL National Renewable Energy Laboratory, emissions associated with electric vehicle charging, impact of electricity generation mix, charging infrastructure availability and vehicle type, Joyce McLaren et al., avril 2016, http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ev_emissions_impact.pdf

Différents scénarios de charge (à domicile H1 et H2, contraint en temps TR, au bureau WP) sont simulés pour estimer l'impact de la variation journalière.

Pour le véhicule électrique BEV, on note les jours où la portée de la batterie est dépassée, et un véhicule conventionnel est supposé utilisé à la place. Il n'en va pas de même pour le véhicule rechargeable PHEV.

De ce fait pour le véhicule électrique, l'essentiel des émissions pendant la circulation est en fait lié à ces jours où l'autonomie de la batterie est dépassée, dans le scénario « low carbon ».

L'étude fournit aussi des calculs d'émissions dans différentes configurations. Les émissions sont temporairement comptées en lbCO₂ (livres de CO₂). Pour mémoire, 1 lb=0,453 g.



Source : NREL National Renewable Energy Laboratory, emissions associated with electric vehicle charging, impact of electricity generation mix, charging infrastructure availability and vehicle type, Joyce McLaren et al., avril 2016, http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ev_emissions_impact.pdf

L'étude obtient les résultats suivants pour le mix énergétique « low carbon », pertinent dès aujourd'hui en France.

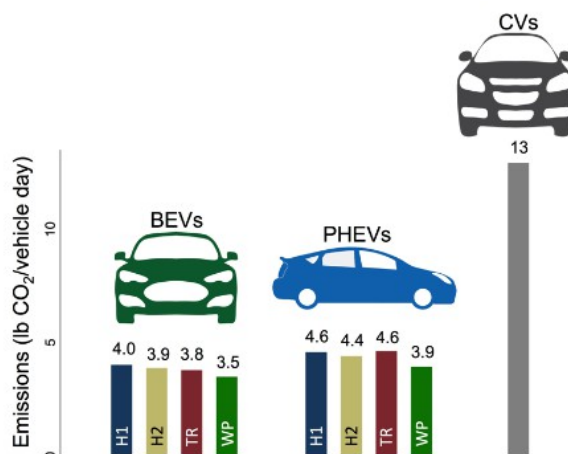


Figure 17. Comparison of total BEV and PHEV emissions with emissions from a conventional vehicle on a low carbon grid.

Source : NREL National Renewable Energy Laboratory, emissions associated with electric vehicle charging, impact of electricity generation mix, charging infrastructure availability and vehicle type, Joyce McLaren et al., avril 2016, http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ev_emissions_impact.pdf

Et celui-ci pour le « high-carbon », non pertinent en France, mais fréquent dans de nombreux pays étrangers.

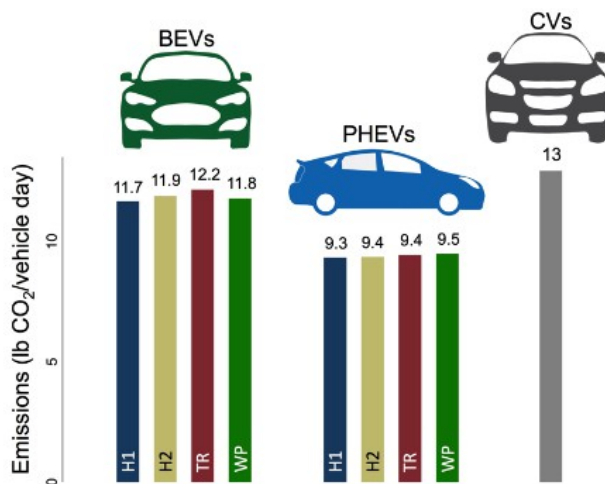
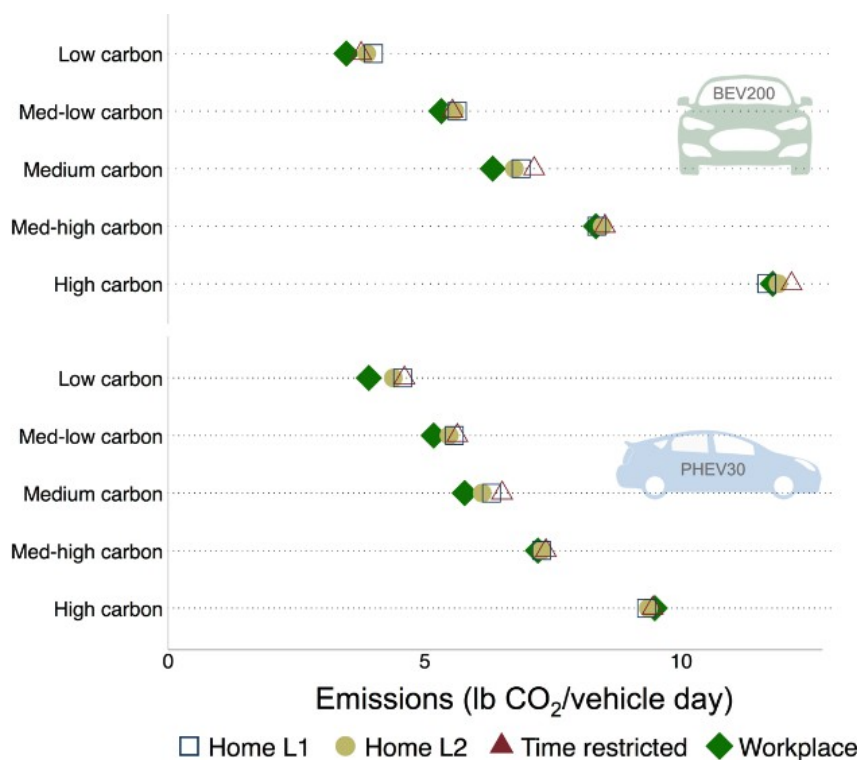


Figure 18. Comparison of total BEV and PHEV emissions with emissions from a conventional vehicle on a high carbon grid

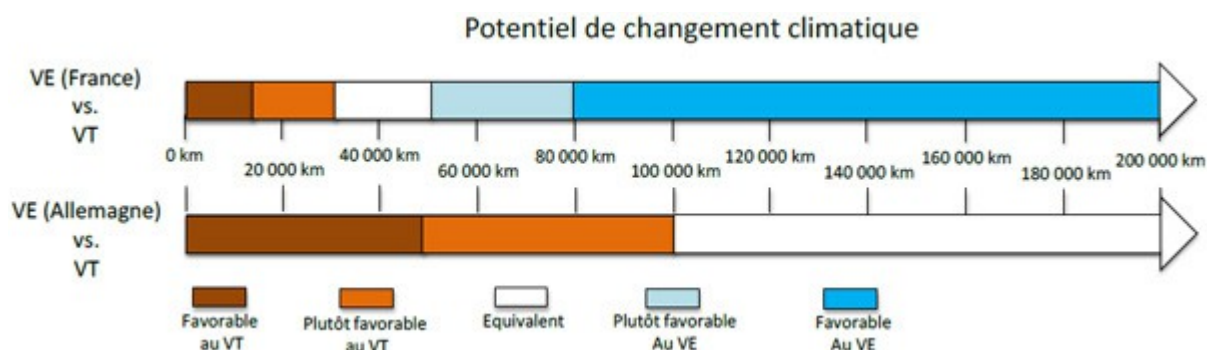
Source : NREL National Renewable Energy Laboratory, emissions associated with electric vehicle charging, impact of electricity generation mix, charging infrastructure availability and vehicle type, Joyce McLaren et al., avril 2016, http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ev_emissions_impact.pdf



Émissions de CO₂ par jour, selon les scénarios. Source: NREL National Renewable Energy Laboratory, emissions associated with electric vehicle charging, impact of electricity generation mix, charging infrastructure availability and vehicle type, Joyce McLaren et al., avril 2016, http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ev_emissions_impact.pdf

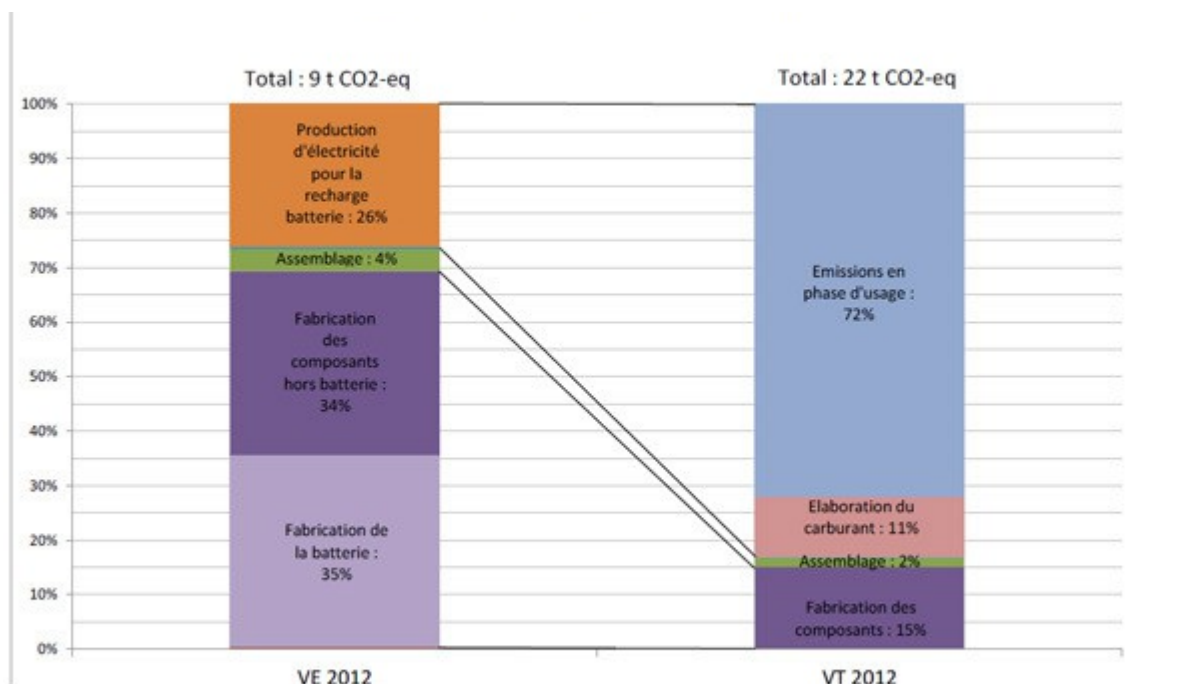
Tout ceci ne vaut que pour des mix énergétiques peu favorables. Selon l'étude de l'ADEME précitée « ELABORATION SELON LES PRINCIPES DES ACV DES BILANS ENERGETIQUES, DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET DES AUTRES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX INDUITS PAR L'ENSEMBLE DES FILIERES DE VEHICULES ELECTRIQUES ET DE VEHICULES THERMIQUES, VP DE SEGMENT B (CITADINE POLYVALENTE) ET VUL A L'HORIZON 2012 ET 2020 »²⁸, « En France, les véhicules électriques étudiés affichent un avantage sur de nombreux indicateurs, dont l'effet de serre: on observe une réduction d'environ 65% sur les émissions de gaz à effet de serre par rapport à un véhicule thermique comparable en 2012, en raison du pourcentage élevé d'énergie nucléaire. Cette performance dépend fortement du mode de production de l'électricité: en revanche, à l'horizon 2020, le véhicule électrique modélisé pour une utilisation en Allemagne affiche une contribution à l'indicateur de changement climatique aussi élevée que celle d'un véhicule Diesel. ».

²⁸ Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de GES et d'autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020
http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf



Potentiel de changement climatique d'un VE en France et en Allemagne – Source, Source : Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de GES et d'autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf ou <http://www.avem.fr/actualite-vehicule-electrique-et-analyse-du-cycle-de-vie-l-ademe-confirme-la-pertinence-environnementale-du-ve-4637.html>

Et l'avis de l'ADEME « les potentiels du véhicule électrique » en date d'avril 2016, indique qu'avec un mix décarboné, les émissions sur cycle de vie d'un véhicule électrique sont typiquement de moitié moindres que celles d'un véhicule thermique (9 tCO₂eq au lieu de 22 tCO₂eq)²⁹.

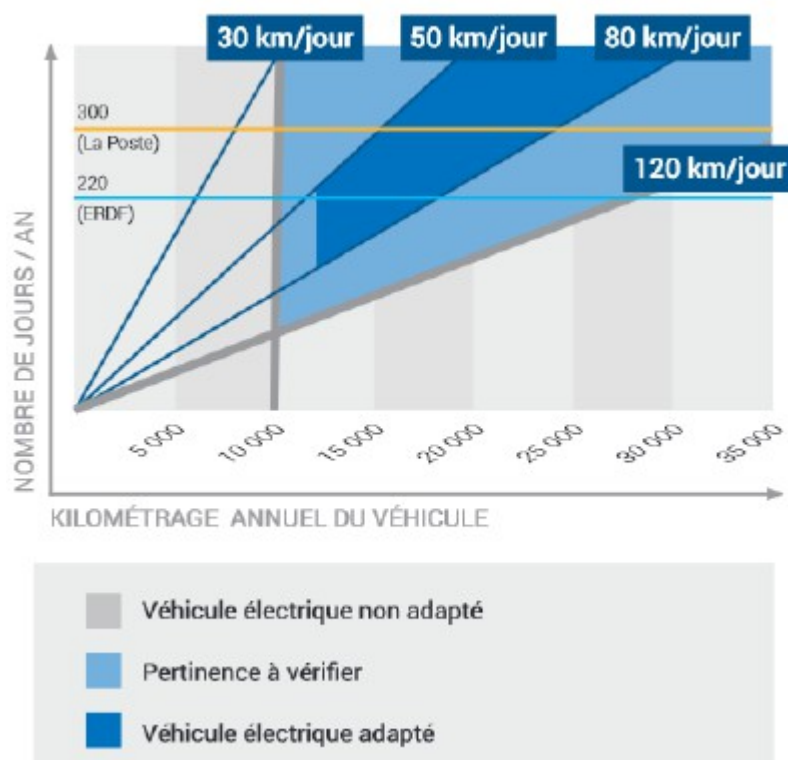


Contributions au potentiel de changement climatique des étapes du cycle de vie du véhicule électrique et du véhicule thermique en France en 2012 – Source : Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de GES et d'autres impacts environnementaux induits par

²⁹ Les potentiels du véhicule électrique, ADEME, avril 2016, <http://www.ademe.fr/potentiels-vehicule-electrique>

l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/90511_acv-comparative-ve-vt-rapport.pdf ou <http://www.avem.fr/actualite-vehicule-electrique-et-analyse-du-cycle-de-vie-l-ademe-confirme-la-pertinence-environnementale-du-ve-4637.html>

Sur ce dernier point, l'avis de l'ADEME « les potentiels du véhicule électrique » en date d'avril 2016), documente aussi les domaines de pertinence des véhicules.³⁰



Pertinence économique du véhicule électrique en fonction de son usage (quotidien/annuel) constatée dans le cadre du projet InfiniDrive – Source, Les potentiels du véhicule électrique, ADEME, avril 2016, <http://www.ademe.fr/potentiels-vehicule-electrique>

On constate que selon ce graphique, qu'il faut actuellement pour rentabiliser le véhicule électrique un parcours moyen significatif : au plus 12 000 km d'après le graphique, inférieur au parcours moyen (14 000 km environ). De plus, le kilométrage entre deux recharges doit être inférieur à ce que permet l'autonomie de la batterie, ce qui favorise les usages dont les parcours sont réguliers d'un jour à l'autre, à ce stade entre 50 et 80 km par jour dans l'exemple qu'a retenu l'Ademe. Au vu des progrès actuellement observés, ces domaines de pertinence vont probablement s'élargir, notamment du fait des augmentations d'autonomie et des baisses de coût.

Un domaine de pertinence du VE en pratique, au moins au début, peut être celui du deuxième véhicule destiné aux déplacements de la vie quotidienne pour un ménage bi-motorisé, ce qui évite la question délicate des trajets longs interurbains pouvant être assurée par un véhicule thermique ou un VHR.

³⁰ Les potentiels du véhicule électrique, ADEME, avril 2016, <http://www.ademe.fr/potentiels-vehicule-electrique>

À signaler aussi que certains constructeurs proposent un véhicule électrique avec une extension d'autonomie (Electric vehicle Range extension) en essence (moins de 15 litres) permettant d'assurer les déplacements longs exceptionnels et d'éviter l'angoisse de l'épuisement de la batterie. L'inconvénient est que le moteur thermique associé est souvent un moteur d'appoint peu optimisé en termes de consommation.

La question du bilan du véhicule hybride rechargeable en matière de GES reste à établir. Si le prix du joule électrique est moindre que le joule en carburant, on pourrait s'attendre à ce que l'utilisateur privilégie l'énergie électrique la plupart du temps sauf impossibilité. Cependant, il y aurait aussi des cas de VHR, souvent d'entreprise, souvent achetés pour des raisons d'image, mais utilisés de fait essentiellement dans le mode thermique, de manière donc peu optimale. En émission instantanée, on peut s'attendre, dans le cas d'un mix électrique décarboné comme en France, à une émission significativement supérieure pour le VHR par rapport au VE, au prorata de la conduite en mode thermique. Sur le cycle de vie, il faut tenir compte des émissions grises associées notamment à la construction de la batterie, selon certaines sources³¹ indiquent que le VHR émet, en ACV, 50 % de plus que le VE.

2.3.10. Impact de l'électrification du parc routier sur la demande électrique

Quel pourrait être l'impact d'une large électrification du parc routier sur la demande en électricité, que ce soit en énergie et en puissance ?

En énergie, avec la répartition des circulations 2015 (source CCTN), et des hypothèses d'électrification des parcours de 70 % pour les VP (et VUL étrangers), et de 30 % pour les PL, plus difficilement électrifiables en première approche, on arrive à environ 50 TWh/an, soit un peu moins de 10 % de l'énergie électrique produite en France.

Véhicules électriques LT	2015 avec circulations 2015			
	G veh-km/an	taux parcours élec	G veh-km/an élec	TWh/an
VP et VUL étr	443	70%	310	37
2R	14	90%	13	1
VUL F	97	50%	49	8
PL	30	30%	9	5
Total	584		380	51
prod elec France 2015	547 TWh		en France	9,3%

Source : exemples de calculs de la mission

Une récente note de France stratégie « le véhicule propre au secours du climat – actions critiques »³², pour sa part, considère qu'un parc automobile constitué entièrement de véhicules électriques consommerait 90 TWh/an. Les ordres de grandeur restent cohérents.

Il est considéré que le problème le plus important réside dans la puissance appelée. En termes de puissance appelée, il convient de compléter avec des hypothèses de nombre d'heures de chargement moyen. Si l'on retient par exemple un étalement de la charge sur les mêmes 5 heures par jour (pour 70 % de l'énergie de la batterie), sur 300 jours par an, on obtient un appel de puissance de l'ordre de 24 GW, à mettre en

³¹ <https://grenelleannecy.net/2015/12/18/etude-dimpact-vehicules-electriques-vs-thermiques/>

³² <http://www.strategie.gouv.fr/publications/20172027-vehicule-propre-secours-climat-actions-critiques>

relation entre une consommation intérieure horaire maximale en 2015 à 92 GW (06/02/2015 19h) et minimale à 30 GW (16/08/2015 7h) (source bilan RTE 2015).

L'étude de France Stratégie mentionnée *supra*, de manière similaire, indique que « *la concomitance des recharges peut induire des appels de puissance considérables, que ne pourrait supporter notre système électrique. Un parc de 30 millions de véhicules électriques se rechargeant en même temps à 19 heures, même lentement à 3 kW, nécessiterait une puissance supplémentaire de 90 GW, soit un quasi doublement de la demande de pointe actuelle* ».

Ce résultat est sensible aux hypothèses de nombre d'heures de recharge par jour, et la puissance appelée pourrait être plus forte si le nombre d'heures est plus faible, ou moindre si la recharge de différents véhicules n'est pas simultanée. Ce qui incite à l'encouragement du lissage des chargements, toutes choses égales d'ailleurs.

2.3.11. Les motos et scooters électriques sont plus chères à l'achat mais deviennent compétitives sur le cycle de vie

Les réductions de coût des batteries électriques permettent également d'envisager une motorisation électrique des motos. Plus chères à l'achat, les économies en carburant permettent déjà souvent la rentabilisation sur la durée de vie des surcoûts à l'achat. Le fonctionnement du moteur est également plus simple, amenant une maintenance simplifiée pour le groupe moto-propulseur (niveaux d'huile, réglage des soupapes, changement de bougies, remplacement de filtres,...).

L'autonomie est variable selon les modèles, mais il existe des versions avec une autonomie de plus de 200 km en ville, convenant aux usages les plus fréquents, voire 300 avec une batterie complémentaire.

L'attractivité commerciale est également renforcée les accélérations sont plus vives qu'une motorisation standard. La moto électrique permet également, outre les réductions de GES, une réduction de la pollution de l'air locale et du bruit, tellement bas qu'il peut poser un sujet en matière de sécurité routière.

Diverses offres sont d'ores et déjà accessibles, certaines avec le permis moto (A1), d'autres avec le permis auto (B) et une formation complémentaire de quelques heures.

L'offre commerciale concerne aussi le « scooter » électrique, caractérisée par des avantages comparables par rapport aux versions thermiques. Elle pourrait se développer dans un premier temps avec l'offre de scooters en libre-service proposée notamment par l'opérateur « cityscoot » en partenariat avec la Ville de Paris qui devrait proposer un millier de véhicules au début 2017. L'utilisateur réservera le véhicule grâce à son smartphone, bénéficiera d'un casque, et ne nécessitera pas de permis sous condition d'âge toutefois (être né avant le 1/1/1998). Il n'aura pas à se préoccuper de la recharge, sous réserve de le déposer dans la zone prévue à cet effet.

L'utilisation de motos ou scooters électriques se développe dans certaines administrations publiques. L'usage par les forces de l'ordre (par exemple comme à Barcelone qui s'est dotée de scooters électriques pour sa police municipale) peut également contribuer à crédibiliser les avantages économiques en matière de cycle de vie et de performances (notamment en accélération) vis-à-vis d'un public qui peut encore être sceptique.

Les motos et scooters ne bénéficient pas du dispositif de bonus malus à l'achat, à la différence des automobiles et des camionnettes, même s'il y a des aides au niveau local dans quelques villes (notamment Paris, Villeneuve-Les-Avignon, Nice, Lyon ou Aix-Les-Bains).

Bien entendu, comme pour les véhicules électriques, il y a une part substantielle d'énergie grise (et donc de GES) dans la fabrication du véhicule et de sa batterie, ainsi que son démantèlement. Plus la batterie est capacitaire, et plus l'énergie grise l'est aussi. Ce qui incite à ne pas prévoir une batterie trop capacitaire par rapport aux usages les plus fréquents pour chaque utilisateur.

Ainsi le scooter électrique comprend moins d'énergie grise que la moto électrique, mais davantage qu'un vélo à assistance électrique. Ce dernier ne convient toutefois pas à la clientèle qui ne souhaite pas pédaler, malgré les co-bénéfices en termes de santé que cela peut lui conférer.

Un élargissement aux motos et scooters du dispositif de bonus malus semble souhaitable. Par exemple, au Royaume-Uni une aide gouvernementale allant jusqu'à 1500 £ par moto électrique serait disponible.

Elle réduirait l'écart de prix constaté, à l'achat, aujourd'hui de l'ordre de 5 000 euros (15 000 contre 10 000 pour le modèle le plus vendu), certes compensé dans la durée par le moindre coût de carburant et de maintenance.

Typiquement une moto consomme environ 5,4 litres aux 100 km, contre un équivalent électrique autour de 0,4 litres aux 100. Sur un cycle de vie de 100 000 km (ou un peu plus avec de l'actualisation), à un prix de l'essence à 1,4 euros par litre, l'économie est donc de 7 000 euros, en dehors du sujet de la maintenance, également plus économique.

La possession d'une moto électrique est donc d'ores et déjà conforme à un choix rationnel de l'utilisateur à usage non-interurbain, compte tenu de la TICPE sur l'essence et en faisant l'hypothèse que la fiscalité restera stable. Un système de bonus aiderait probablement à franchir le pas.

Outre les avantages pour des pays développés, la hausse des volumes et donc la baisse du prix des motos et scooters électriques et vélos à assistance électriques serait favorable au transfert des technologies vers les pays en développement, où la moto ou le scooter ou le VAE présentent une part nettement plus importante de la mobilité qu'en France ou en Europe. Une étude de Satiennam et al.³³ montre par exemple que, en Thaïlande, 16 % des utilisateurs de motos seraient déjà prêts à basculer sur l'électrique, et que cela réduirait toutes choses égales d'ailleurs, de 2,4 % les émissions de CO₂ de l'ensemble du secteur des transports de ce pays (vraisemblablement hors énergie grise), le nombre de motos dans le parc (et de scooters vraisemblablement) dépassant le double de celui des voitures. Si 90 % des motos y basculaient sur l'électrique dans quelques années, la réduction des émissions de CO₂ dans les transports dans ce pays serait ainsi de 13,5 %.

A l'évidence, les mêmes questions d'accès à des prises électriques (copropriétaires et locataires, ainsi que sur le lieu de travail ou d'études) se posent pour les motos et

³³ A Study of Potential Electric Motorcycle Use to Support a Low Carbon Society: Case of a Developing Asian City Thaned SATIENNAM, Wichuda SATIENNAM, Phongphan TANKASEM, Piyanat JANTOSUT, Jessadaporn THENGNAMEE, and Weerut KHUNPUMPHAT, advanced material research, Vols. 931-932 (2014) pp 541-545, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.675.2868&rep=rep1&type=pdf>

scooters électriques, avec peut-être en plus un sujet de mise en œuvre du droit à la prise pour des jeunes domiciliés chez leurs parents.

Pour des utilisateurs avec une forte proportion de trajets interurbains, une approche hybride rechargeable avec utilisation progressivement de plus en plus élevée de bio-carburants paraît la voie la plus évidente, ce qui n'exclut pas à moyen-long terme le deux-roues à hydrogène.

2.3.12. La prise électrique, vraisemblable goulot d'étranglement, nécessitera au bon moment des mesures de mise aux normes obligatoires des parkings de logements collectifs et des entreprises

Un gros avantage de la migration vers le véhicule électrique ou hybride rechargeable est la disponibilité d'électricité dans la plupart des bâtiments.

Un décret de juillet 2016, applicable début 2017, rend obligatoire le pré-équipement des immeubles neufs en prises pour véhicules électriques, que ce soit de logements mais aussi de bureaux, de services publics ou commerciaux, et ce avec un système de comptage individuel.

C'est bien sûr souhaitable, mais avec un parc qui ne se renouvelle avec un taux de moins de 0,5 % par an, il faudrait 200 ans pour obtenir ainsi un impact significatif. C'est bien sûr beaucoup trop. De plus, au moins pour les parkings, les taux d'équipement ne sont que partiels.

Répartition par cible des obligations de pré-équipement électrique des parcs de stationnement dans les bâtiments neufs

Capacité du parking	Type de parking				
	Habitation	Tertiaire	Industriel	Service public	Ensemble commercial/ cinémas
≤ 40 places	50% des places de stationnement	10% des places de stationnement	10% des places de stationnement	10% des places de stationnement	5% des places de stationnement
> 40 places	75% des places de stationnement	20% des places de stationnement	20% des places de stationnement	20% des places de stationnement	10% des places de stationnement



Avere, http://www.aver-france.org/Site/Article/?article_id=6655

Les maisons individuelles représentent 56 % du parc de logements, des solutions de recharge sont commercialisées, à des prix de l'ordre de 350 euros installation comprise, avec la possibilité d'une déduction fiscale allant jusqu'à 30 %. Certaines collectivités (par exemple la Ville de Paris) majorient cette aide. La gouvernance du choix d'équipement semble assez simple pour un propriétaire occupant, situation dans laquelle se trouvent la majorité des occupants maisons individuelles, donc environ

45 % des ménages, en général plutôt loin des centre-villes, donc de là où les bénéfices du véhicule électrique en matière de pollution locale seraient les plus importants³⁴.

Pour les locataires en maison individuelle, c'est déjà plus compliqué, car le locataire peut avoir besoin d'une autorisation, ou ne pas investir du fait de la durée courte de son occupation anticipée.

Pour les logements collectifs, la situation semble bien plus complexe, comme le montre le schéma décisionnel ci-dessous, qui traite implicitement du cas le plus simple d'un propriétaire occupant, celui d'un locataire d'un appartement désirant charger son véhicule étant encore plus complexe. Il y a certes un « droit à la prise », puisque le syndic ne peut s'opposer sans motif sérieux et légitime.

Mais on y lit des délais, des recours judiciaires hasardeux susceptibles de décourager en pratique la plupart des ménages. Ils seraient de 3 à 6 mois si le syndic accepte « spontanément », voire 18 mois en cas de nécessité de lancer un recours judiciaire. Et si l'occupant réalise les travaux à ses frais, les coûts peuvent être très lourds d'une part (2000€ pour 25 m à 6000€ pour 100 m) selon la longueur du câble notamment), et de plus dé-optimisés si chaque prise fait l'objet de travaux séparés.

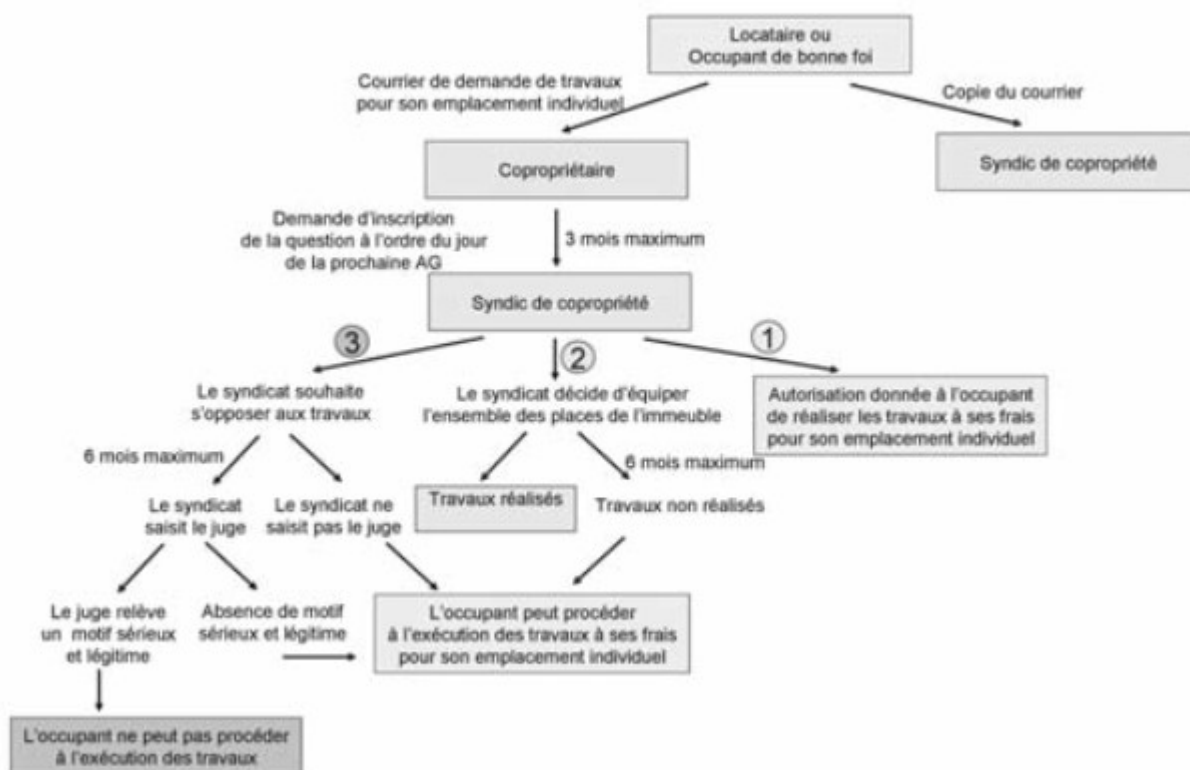
De plus se posent des questions de puissance appelée maximale, si celle-ci n'est pas augmentée et donc de priorisation des véhicules, et donc du risque de ne pas avoir chargé en fin de nuit, qui constitue à l'évidence un handicap lourd commercial.

Tout cela découle du principe de protection des occupants qui n'ont pas de véhicule électrique. A la fois du point de vue des coûts des travaux, mais aussi du coût des abonnements si la puissance souscrite augmente, ou pour des questions d'assurance.

Si l'on se dit que l'on vise dans le cadre de la lutte contre le changement climatique une part majoritaire de véhicules hybrides rechargeables et électriques, on ne peut se limiter à des solutions pratiques dans 45 % des cas seulement, il faut aussi des solutions simples et abordables pour les autres 55 %.

³⁴ Insee, le parc de logements au 1er janvier 2014, http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?ref_id=if16

> Processus de décision du syndicat de copropriété



La voiture électrique dans les copropriétés, ARC (association des responsables de copropriétés), http://arc-copro.fr/sites/default/files/files/Gratuit_libre-Voiture_Elect.pdf

En conséquence, le véhicule électrique trouve son marché moins en ville qu'à la campagne. Par exemple, selon Renault³⁵, 50 % des véhicules Zoe sont vendus à la campagne, 35 % en zone péri-urbaine et 15 % en ville. Certes, la rentabilisation du véhicule pour son propriétaire passe aussi par l'atteinte d'un nombre minimum de km parcourus par an, mais la facilité d'installation des prises en maisons individuelles à la campagne et en périurbain joue aussi un rôle. Du point de vue de la pollution locale de l'air et du bruit, le véhicule électrique serait par contre plus utile en ville que dans les champs.

Il serait utile de corroborer ce premier diagnostic avec celui d'autres constructeurs.

Il serait donc souhaitable de rendre le « droit à la prise » plus facile dans les immeubles collectifs. Cela suppose d'inverser les ordres de priorité entre la protection des non-utilisateurs et la facilité pour les occupants qui le désirent de s'équiper.

Il faut probablement dans un premier temps autoriser des majorités simples à voter ce type d'équipement pour une part significative des places. Ceci dit, pour les 10 % premiers utilisateurs, ils seront probablement même dans ce cas en minorité et il risque de ne rien se passer.

³⁵ Voiture électrique : des villes ou des champs, Breezcar, 4 septembre 2016, <http://www.breezcar.com/actualites/article/voiture-electrique-vente-campagne-et-ville-0916>

A Amsterdam par exemple, un acquéreur de véhicule électrique a droit à une place de stationnement équipée près de chez lui, avec une borne prise en charge par la municipalité.

Il faudra donc passer assez rapidement à une « mise aux normes » obligatoire d'une partie significative des places, y compris à domicile, et pas seulement dans des cas de rénovation lourde du parking. Cette mesure pourrait être certes critiquée comme une dépense pour une demande faible au départ si elle était mise en œuvre trop tôt. Le moment de son déclenchement devrait donc être choisi avec soin, par exemple lorsque la part des véhicules électriques et hybrides rechargeables en maison individuelle dans les acquisitions aura dépassé 1 % et sera en forte croissance, il sera bien plus difficile de critiquer le bien-fondé d'une telle mesure pour les stationnements collectifs et les entreprises et autres bâtiments.

En tout cas, on voit que le sujet des prises risque fort d'être le facteur le plus bloquant au développement des véhicules hybrides rechargeables puis des véhicules électriques.

Derrière les prises se posera également le sujet du renforcement des réseaux de distribution, puis à plus long terme de transport de l'électricité. Là aussi les investissements seront probablement lourds, ceci dit leur nature plus collective laisse entrevoir moins de problème que celui posé par les prises.

2.3.13. Le GPL plus intéressant pour la pollution locale que pour les GES

Le premier gaz utilisé actuellement est le GPL, mélange de propane et de butane. Avec 0,26 millions véhicules roulant au GPL en 2015, c'est le premier carburant alternatif actuellement. Il a représenté 3 % des ventes de VP en 2010 mais stagne depuis, voire régresse en France.

Au-delà des avantages en matière de pollution locale (pas de particules et peu de NOx), il présente l'avantage que le véhicule ne coûte pas plus cher à l'achat qu'un véhicule essence. 1 700 stations sont disponibles en France soit 1 station sur 7.

Grâce aux différences de fiscalité, il coûtait en France 0,7 euros en mai 2016 à la pompe (selon le comité français du butane et du propane, CFBP). Cependant, compte tenu de la plus forte consommation par litre (en raison du moindre pouvoir calorifique par litre), le bilan ne serait pas avantageux pour un gros rouleur par rapport au diesel.

Ses émissions de CO₂ étaient de l'ordre de 15 à 20 % de moins que l'essence (17,5 kg C/GJ pour le GPL contre 19,9 pour l'essence), mais pas beaucoup moins que le diesel à même distance, et même de moins en moins par rapport aux nouveaux moteurs.

Le bilan GES doit également intégrer le sujet des fuites éventuelles de gaz à haut pouvoir réchauffant, lors de la production, ou de la distribution, qui peuvent remettre en cause complètement le bilan GES.

Les emplacements de stationnement publics, y compris souterrains, sont ouverts aux véhicules GPL, sous réserve qu'ils disposent d'une soupape de sécurité, désormais obligatoire. L'autorisation serait également généralement donnée sous cette condition dans les parkings des copropriétés.

Il reste un inconvénient important, concernant le volume du coffre qui est réduit, à moins d'utiliser un réservoir torique, et de remplacer la roue de secours par une bombe anti-crevaison. L'offre de véhicules neufs est faible. L'autonomie est plus faible, le remplissage du réservoir prend un peu de temps, et l'entretien doit être confié à des professionnels rares.

Cependant, le bilan pour l'utilisateur du GPL est cependant meilleur dans certains pays étrangers : par exemple en Belgique (prix du litre GPL à 0,2 euros), en Italie (0,5 euros/litre) avec 1,7 millions de véhicules, ou en Pologne avec 2,3 millions de véhicules GPL en circulation, contre 0,18 en France (2011). L'Italie dispose de 3 850 pompes contre 1 700 en France.

 AUSTRIA 33 distributori	 BELGIUM 544 distributori
 CROATIA 301 distributori	 FRANCE 1695 distributori
 ITALY 3853 distributori	 LUXEMBOURG 12 distributori
 NETHERLANDS 1584 distributori	 SANMARINO 8 distributori
 SLOVENIA 103 distributori	 SPAIN 420 distributori
 SWITZERLAND 52 distributori	

Stations GPL, juillet 2016, dans quelques pays européens,
<http://www.ecomotori.net/distributori/gpl/>

L'intérêt collectif du GPL semble donc être davantage à ce stade lié à la pollution de l'air local que pour le CO₂. Mais il permet de préparer la transition vers le bio-GPL, qui lui permet de réduire fortement les émissions de CO₂. En revanche, sa réputation de « bombe sur roues » semble désormais largement injustifiée.

2.3.14. Le bio-GPL, des perspectives pour les déchets, mais des questions au-delà

Il convient cependant d'examiner le sujet du bio-GPL. Issu de déchets et de résidus majoritairement (60%), il permet une forte réduction du CO₂. Une première usine est en cours de construction aux Pays-Bas et devrait ouvrir fin 2016, et ce carburant être commercialisable à compter de mars 2017 (source Primagaz).

Son taux de réduction de CO₂ pour aller jusqu'à 80 % selon ses promoteurs.

Il présente l'avantage de ne pas devoir modifier un véhicule déjà apte à utiliser le GPL. C'est donc la perspective du bio-GPL qui seule amène à encourager le GPL à ce stade du point de vue du CO₂.³⁶

La question des fuites de gaz (cf plus bas sur le GNV) est cependant susceptible de changer fortement le bilan GES. Produire des productions agricoles supplémentaires pour ensuite émettre lors de fuites, même de quelques %, du gaz à haut pouvoir réchauffant ne semble pas très intéressant.

³⁶ <http://www.flotauto.com/biogpl-primagaz-pompe-2017-20160706.html>

À noter qu'il existe une offre de véhicules hybrides GPL électricité en République de Corée (Sud), où le GPL atteint 20 % du parc environ.

2.3.15. Le GNV et le GNL sont également surtout intéressants pour la pollution locale ; du point de vue GES leur potentiel comme carburant de transition pourrait être limité dans certains pays du fait des fuites à la production et à la distribution

Il s'agit d'un gaz naturel pour véhicules (GNV) comportant essentiellement du méthane.

Par rapport au GPL, la densité volumique du gaz naturel comprimé à 200 bars (GNC) est nettement plus faible, donc il occupe plus de place, ceci dit en première monte, il est possible de placer le réservoir sous la carrosserie. En revanche son coût de production est un peu plus faible que le GPL.

Il permet ainsi une autonomie de 300 km. Des poids lourds, autobus ou autocars ou engins spéciaux, ainsi que des locomotives peuvent l'utiliser également.

Il existe également des poids lourds circulant au gaz naturel liquéfié (GNL), ainsi que des navires, et des locomotives, ce type de carburant étant peu adapté aux véhicules particuliers du fait de la taille minimale viable du réservoir. L'autonomie pour un poids-lourd peut ainsi être de 1000 km.

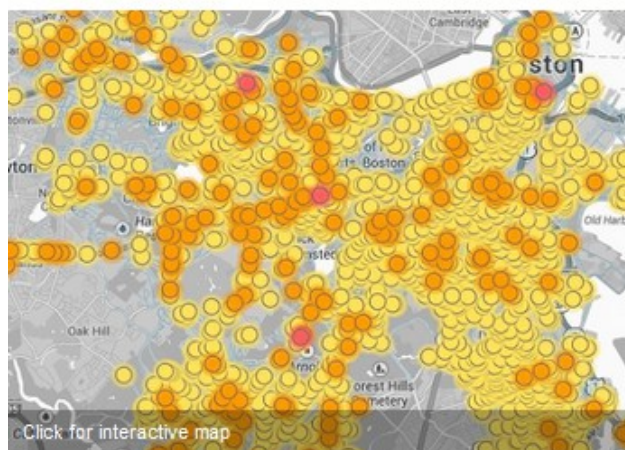
Comme le GPL, ses émissions de CO₂ étaient de l'ordre de 15 à 20 % de moins que l'essence, voire même un peu plus basse (15,5kg C / GJ pour le gaz naturel contre 19,9 pour l'essence) mais pas beaucoup moins que le diesel à même distance, et même de moins en moins par rapport aux nouveaux moteurs.

Le bilan GES ne doit pas inclure le seul CO₂. Il est en fait dépendant des fuites de méthane. Comme le pouvoir réchauffant du méthane est très fort par rapport à celui du CO₂, il suffit de peu de fuites, soit à la production, soit à la distribution, pour en dégrader le bilan.

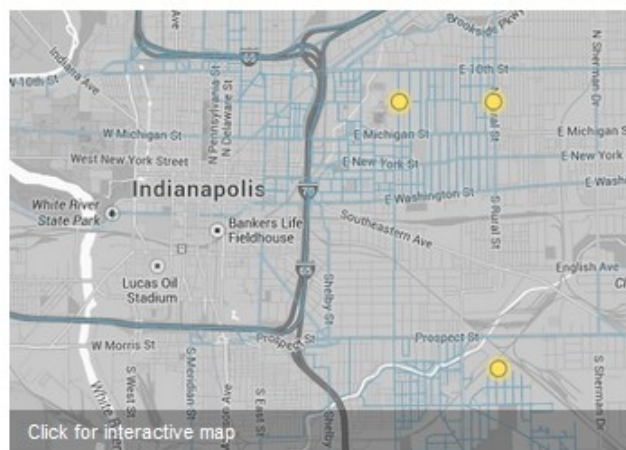
Par exemple avec 6 % de fuites (des études américaines indiqueraient 4 à 9 % dans les champs gaziers et 2,7 % dans la distribution à Boston), et un pouvoir réchauffant global de 25 (nouvelles estimations GIEC) à 100 ans, on arrive à un supplément de $0,06 \times 25 \text{ gCO}_2$ par gCH₄ brûlé soit, compte tenu du fait qu'un gCH₄ produit par combustion $44/16 \text{ gCO}_2$, un supplément de $0,06 \times 25 / (44/16) = 55\%$ environ, ce qui change le bilan GES du GNV par rapport au pétrole. Mais on ne connaît pas les taux de fuites concernant la France (production, transport, distribution,...).

Les taux de fuite dans les réseaux de distribution sont mesurables par des véhicules détecteurs de méthane, ce qui permet avec un SIG d'obtenir des cartographies contrastées :

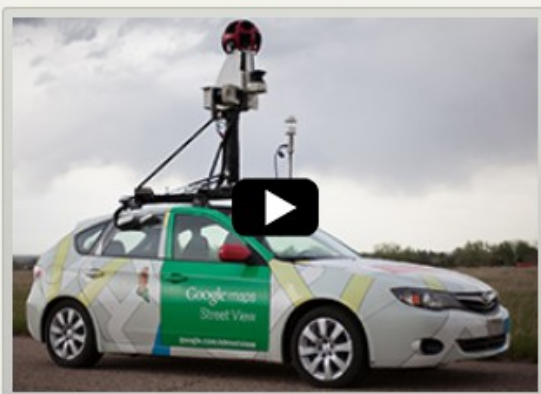
Boston: Older pipes, more leaks



Indianapolis: Newer pipes, fewer leaks



Video: How we map cities



See how we're using Google Street View cars and methane sensors to detect leaks under city streets.

Natural gas, local leaks impact global climate, EDF (environmental defense fund), <https://www.edf.org/climate/methanemaps>

L'étude référencée ci-dessous fait par exemple le point sur la situation en Amérique du nord.

Methane Leaks from North American Natural Gas Systems

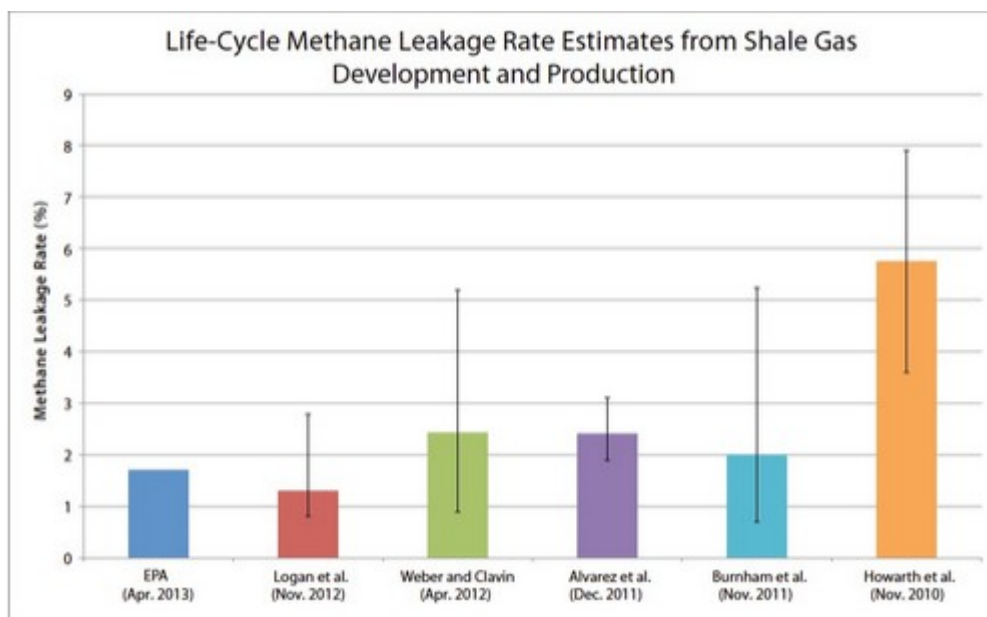
A. R. Brandt^{1,*†}, G. A. Heath², E. A. Kort³, F. O'Sullivan⁴, G. Pétron^{5,6}, S. M. Jordaán⁷, P. Tans⁵, J. Wilcox¹, A. M. Gopstein^{8,†}, D. Arent^{2,9}, S. Wofsy¹⁰, N. J. Brown¹¹, R. Bradley¹², G. D. Stucky¹³, D. Eardley¹³, R. Harriss¹⁴

+ Author Affiliations

*†Corresponding author. abrandt@stanford.edu

Science 14 Feb 2014:
Vol. 343, Issue 6172, pp. 733-735
DOI: 10.1126/science.1247045

Le diagramme ci-dessous montre aussi l'importance des fuites lors de la production de gaz de schiste aux États-Unis.



Methane leakage not a deal breaker for natural gas, the energy collective, juillet 2013, <http://www.theenergycollective.com/maxluke/255036/methane-leakage-not-deal-breaker-natural-gas-response-anthony-r-ingrafea>

Le problème ne semble pas concerner que le gaz de schiste. A la source, dans le monde, il semblerait y avoir des fuites de méthane significatives, variables selon les pays, dont on ne connaît pas la proportion brûlée, comme le montre cette carte obtenue par des mesures satellitaires. 143 milliards de m³ de gaz naturel seraient ainsi brûlés (« flared ») en 2012, soit 3,5 % de la production totale mondiale. Le principal pays source serait la Russie, avec 25 milliards de m³ par an cette année-là, qui est aussi le premier producteur de gaz naturel. L'Europe en est le principal client. Il n'y a pas registre de ces fuites. Il semblerait que sur le plan technique, éviter une grande partie des fuites à la production serait assez peu coûteux ; mais la production du gaz se situe pour l'essentiel en dehors de la France et même de l'Union européenne.

En France, pour réduire les risques de fuites de gaz, le distributeur GrDF fait circuler un « véhicule renifleur ». Cependant, son objectif premier est de réduire les risques de sécurité, plus que les fuites susceptibles de présenter un impact sur le changement climatique.

La prise de conscience semble émergente en Europe, même s'il s'est tenu en février 2016 un atelier sur le sujet avec les principaux acteurs³⁷. Il conclut que les coûts d'évitement sont assez faibles, probablement 20 % des puits présentent une grande partie des fuites, mais qu'il reste beaucoup à faire et qu'à la base on ne connaît pas l'ampleur précise du sujet.

On voit sur la carte satellitaire également des points rouges en France, mais où le gaz naturel est potentiellement brûlé.

³⁷ http://www.iass-potsdam.de/sites/default/files/files/workshop_methane_emissions.pdf , <http://www.iass-potsdam.de/en/research/earth-energy-and-environment-e3/news/reducing-methane-emissions-natural-gas-industry>



Shocking study shows how much methane is leaked globally, janvier 2016,
<https://beta.theweathernetwork.com/news/articles/california-isnt-the-only-place-leaking-toxic-methane-gas-/62516/>

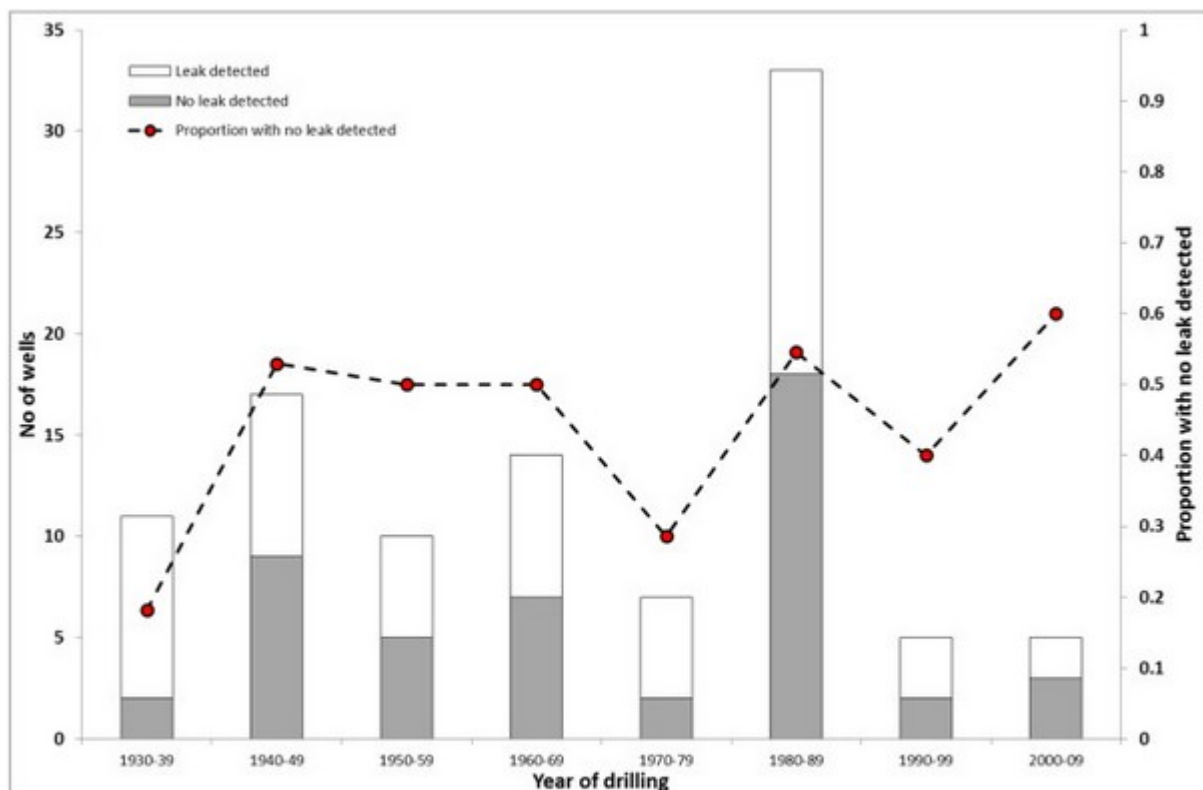


Fig. 4.
 The relative CH_4 concentration for the sample directly above the well head for each site compared to the age since abandonment.

Fugitive emissions of methane from abandoned, decommissioned oil and gas wells

I.M. Boothroyd^a, S. Almond^a, S.M. Qassim^a, F. Worrall^a,  , R.J. Davies^b

 [Show more](#)

doi:10.1016/j.scitotenv.2015.12.096

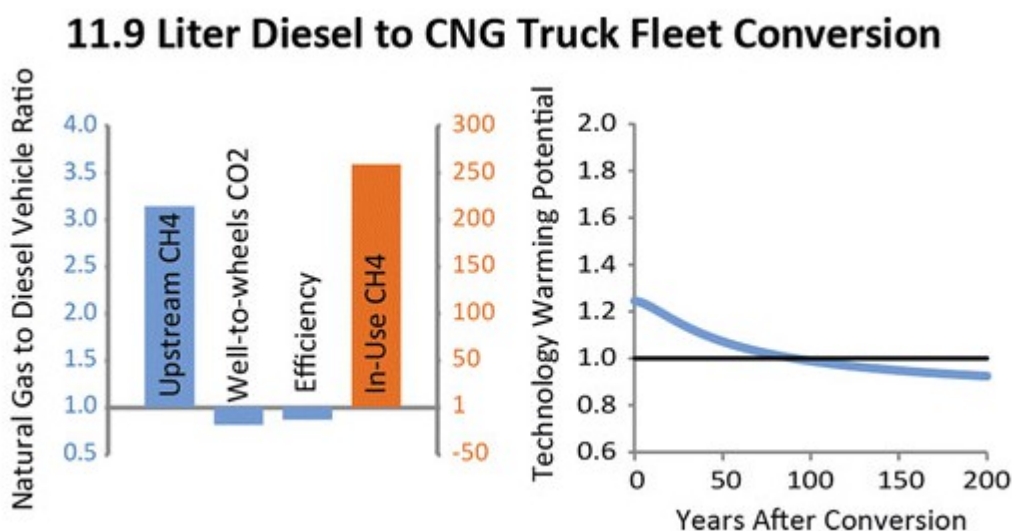
[Get rights and content](#)

Under a Creative Commons license

Fugitive emissions of methane from abandoned decommissioned gas wells, Université de Durham, UK, mars 2016,
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715312535>

Ce problème pourrait concerner aussi les anciens puits, comme le montre le graphique ci-dessus issu d'une étude britannique où l'on voit qu'environ la moitié des anciens puits fuirait.

Le pouvoir réchauffant du méthane est encore plus fort à moins de 100 ans (86 à 20 ans), et donc le point d'équilibre dépend à la fois du taux de fuites et de la durée prise en compte pour le réchauffement.
































Université de Columbia, cité dans <http://www.enerzine.com/1036/18459+quels-impacts-climatiques-pour-les-camions-roulant-au-gaz-naturel+.html>

Il serait donc utile de pouvoir estimer si le taux de fuite est ou pas de nature à changer significativement les émissions GES du méthane.

Comme le GPL, le principal intérêt collectif du GNV est de réduire fortement la pollution de l'air locale.

La Chine est le premier pays mondial avec 4,4 millions de véhicules GNV en 2015. Au Pakistan, 61 % des véhicules roulent au GNV. Il est également très utilisé en Amérique latine.

L'Italie est le premier pays européen pour le GNV. Dans certaines villes, le taux de véhicules au GNV y atteint 7 %. Il s'y trouvait vers la fin 2015 1 134 stations GNV, contre 919 en Allemagne, mais 40 en France.

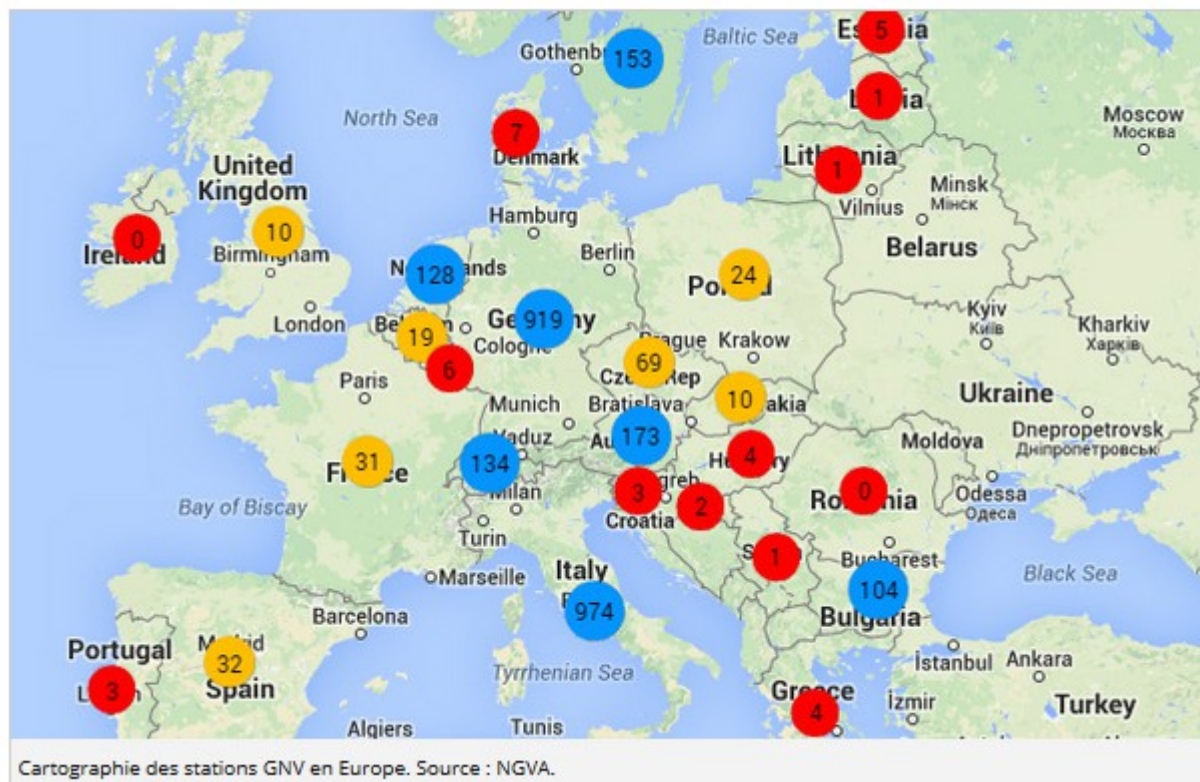
 AUSTRIA 179 distributori	 BELGIUM 46 distributori
 BULGARIA 107 distributori	 CROATIA 2 distributori
 CZECH REPUBLIC 99 distributori	 DENMARK 11 distributori
 ESTONIA 5 distributori	 FINLAND 19 distributori
 FRANCE 40 distributori	 GERMANY 919 distributori
 GREECE 7 distributori	 HUNGARY 9 distributori
 ITALY 1134 distributori	 LATVIA 1 distributori
 LIECHTENSTEIN 2 distributori	 LITHUANIA 3 distributori
 LUXEMBOURG 6 distributori	 MACEDONIA 2 distributori
 NETHERLANDS 142 distributori	 NORWAY 18 distributori
 POLAND 25 distributori	 PORTUGAL 7 distributori
 RUSSIA 239 distributori	 SERBIA 13 distributori
 SLOVAKIA 10 distributori	 SLOVENIA 3 distributori
 SPAIN 39 distributori	 SWEDEN 158 distributori
 SWITZERLAND 138 distributori	

Nombre de stations service GPL en Europe.

<http://www.ecomotori.net/distributori/metano/>

La carte des stations GNV en Europe illustre le retard important français en la matière.

CARTE DES STATIONS GNV EN EUROPE





Source : <http://www.ecomotori.net/distributori/metano/>

Est-il raisonnable de construire un réseau de stations de GNV ?

Pour une station de recharge rapide, de taille moyenne, d'un coût de 800 000 \$, traitant le plein de 55 véhicules légers par jour, on arrive à un coût (sur 20 ans) de son amortissement à 1,8 euros par plein, ou 4 centimes par équivalent litre. Cela semble un ordre de grandeur raisonnable.

Si un véhicule léger fait un plein tous les 400 km, et roule 20 000 km par an, cela représente 50 pleins par an. Pour un réseau de 1 000 stations, il faut donc un parc de $1000 \times (365/50) \times 55 = 0,4$ millions de véhicules, ce qui représente environ 1,3 % du parc VL. En fait, la station sera utile probablement aussi à des PL, donc le taux de pénétration requis du parc VL est nettement plus bas, moins de 1 %, ce qui paraît donc raisonnable.

Medium Station (500–800 gge*/day)

Type	Cost Range	Example Applications	Assumptions
Fast-Fill 	\$700,000–\$900,000	<ul style="list-style-type: none"> Public retail station serving 50–80 light/medium-duty vehicles fueling 10 gge/day or Private fleet station serving 45–65 taxis fueling 12 gge/day 	<ul style="list-style-type: none"> One 180–300 scfm (86–143 gge/hr) compressor 30 psi inlet gas pressure 34,000 scf storage (270 gge) One dual-hose metered dispenser Included installation costs are estimated at 65% of equipment costs
Time-Fill 	\$550,000–\$850,000	Private fleet station serving: <ul style="list-style-type: none"> 50–80 school buses fueling 10 gge/night, 25–40 refuse trucks fueling 20 gge/night, or 75–80 sedans/pick-ups fueling 7 gge/night** 	<ul style="list-style-type: none"> One 100–175 scfm (48–83 gge/hr) compressor 30 psi inlet gas pressure 10–40 dual-hose posts One time-fill panel; 10-hour fueling window Included installation costs are estimated at 65% of equipment costs

*1 gge (gasoline gallon equivalent) = 126 scf (standard cubic feet)

**A time-fill station can accommodate more vehicles than hoses if the vehicles do not fuel every day.

Source :USDoE, costs associated with CNG vehicle fueling infrastructure, septembre 2014 -

http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/cng_infrastructure_costs.pdf

Au début, un tel réseau permettrait de proposer une alternative au diesel ou à l'essence pour améliorer nettement la qualité de l'air en ville, avec un léger progrès sur le plan du CO₂. Progressivement, du bio-gaz pourrait être introduit pour partie, voire à long terme du « Power-to-gas » avec des excédents de ressources électriques intermittentes, pour un gaz dont le contenu en GES serait de plus en plus réduit. Reste le sujet des fuites de gaz à la production et à la distribution, qui peuvent dégrader le bilan GES dans des proportions qui restent à apprécier.

2.3.16. Le bio-gaz est intéressant lorsqu'on le produit à partir de déchets, mais au-delà il rentre souvent en compétition avec la filière alimentaire et pourrait réchauffer à cause des fuites

Le bio-gaz est produit par la fermentation de matières organiques en l'absence d'oxygène. Il peut s'agir de certains déchets, mais aussi de certaines cultures, voire du fond des lacs et marais. Il doit être épuré pour être substituable à du gaz naturel.

Il comprend majoritairement du méthane. Comme le méthane est lui-même un gaz à effet de serre, avec un pouvoir réchauffant à 100 ans de 23 fois plus fort que le CO₂, sa capture en elle-même réduit déjà les émissions de GES.

Globalement, toutes productions confondues, l'Allemagne est en tête avec 10 TWh par an en 2016, devant le Royaume-uni avec 2 TWh, loin devant les 0,082 TWh en France.

À l'échelle actuelle, une incorporation de bio-gaz semble permettre une réduction des GES pour les transports notamment.

Ceci dit, les contraintes de logistique du transport de gaz imposent de consommer le gaz à proximité du lieu de production. S'il y avait davantage de stations de GNV, on

peut supposer que cela ne serait plus un problème majeur pour l'utilisation du biogaz dans les transports.

La principale question est de savoir jusqu'où on peut aller. Il serait possible selon l'ADEME de produire en France 3,25 Mtep dans un premier temps, soit 10% des 32 Mtep de la consommation actuelle de carburants dans les transports en France, puis 9 Mtep en 2050, soit presque 30 % de la consommation actuelle de carburants dans les transports.

Jusqu'à quel point pourrait-on produire du bio-gaz sans trop entrer en compétition avec les filières servant à l'alimentation humaine et celle du bétail ? Il semblerait que la production allemande passe par une culture du maïs importante et déjà décriée, avec des problèmes d'érosion, de pollution liée aux engrais aux phosphates ou de perte de bio-diversité.

Une étude récente de la commission européenne semble indiquer que les bio-carburants ont un bilan négatif en raison de la prise en compte non seulement des intrants et transports associés, mais aussi du changement d'affectation des terres que leur production requiert.

Il y a probablement du potentiel avec une plante herbacée, le « panic érigé » (« switchgrass »), qui peut davantage prospérer sur des terres marginales, arides et chaudes et sans ou avec peu d'engrais. Elle pourrait en outre être utile pour protéger les sols de l'érosion.

Enfin, il conviendrait de regarder avec la plus grande attention le sujet des fuites de méthane dans le cadre de la production ou de la distribution de bio-gaz. Compte tenu du pouvoir réchauffant du méthane, de l'ordre de 25 à 100 ans voire un peu plus, quelques % de fuites remettraient très largement en cause son bilan GES. Ainsi 6 % de fuites par exemple amènerait à un PRG relevé de 50 à 75% selon le PRG retenu.

Si l'on capture du méthane qui aurait été émis de toute façon par des déchets, le bilan ne peut rester que positif du fait du retrait de méthane de l'atmosphère. En revanche, si l'on cultive à dessein des plantes (par exemple le maïs) aux fins de production de bio-gaz, et que les fuites ne seraient pas négligeables, on pourrait être en fait en train de réchauffer la planète en voulant faire le contraire.

2.3.17. Les bio- et agrocarburants risquent d'atteindre assez vite des limites liées à la compétition avec la filière alimentaire et la rareté des sols, et posent peut-être aussi des problèmes liés aux fuites

Les bio-carburants sont des carburants obtenus à partir de matières organiques. Les agrocarburants proviennent de la bio-masse issue de l'agriculture. Au niveau mondial, ils représentent 3 % environ en 2010 de la consommation des carburants transport. En 2011, l'Union européenne incorporait 3,1 % de bio-éthanol contre 14,9 % en Amérique latine et 5,6 % en Amérique du Nord.

En 2015, 79,5 % des bio-carburants consommés dans l'Union européenne (14 Mtep) étaient du bio-diesel, selon Eurobserv'er³⁸. Avec près de 3 Mtep, la France serait en tête de la consommation de biocarburants destinés au transport dans l'Union européenne.

³⁸ Source : Eurobserv'er biofuels barometer juillet 2016, <http://www.eurobserv-er.org/biofuels-barometer-2016/>

Tabl. n° 2

Consommation de biocarburants destinés au transport dans l'Union européenne en 2015 (en tep)*

Pays	Bioéthanol	Biodiesel***	Biogaz carburant	Consommation totale	Certifié soutenable
France	433 839	2 562 445	0	2 996 284	100 %
Allemagne	756 449	1 780 716	41 798	2 578 964	100 %
Italie	21 926	1 131 175	0	1 153 101	100 %
Suède	136 270	849 181	105 933	1 091 384	100 %
Espagne	181 850	788 667	0	970 518	0 %
Royaume-Uni	405 020	520 270	0	925 289	100 %
Pologne	159 461	587 150	0	746 611	100 %
Autriche	57 771	444 498	0	502 268	94 %
Finlande	69 897	364 636	1 911	436 444	100 %
Portugal	22 087	329 034	0	351 121	100 %
République Tchèque	78 617	265 484	0	344 101	100 %
Pays-Bas	141 875	178 514	0	320 388	100 %
Belgique	37 692	229 426	0	267 118	100 %
Hongrie	87 015	122 653	0	209 668	98 %
Danemark**	0	205 909	0	205 909	100 %
Roumanie	41 917	115 490	0	167 407	100 %
Grèce	0	143 164	0	143 164	22 %
Slovaquie	30 954	105 164	0	136 118	100 %
Irlande	30 426	97 575	0	128 001	100 %
Bulgarie	14 832	93 675	0	108 508	100 %
Luxembourg	7 203	73 856	0	81 059	100 %
Lituanie	9 680	57 847	0	67 528	98 %
Slovénie	5 804	36 233	0	42 037	100 %
Croatie	0	29 354	0	29 354	100 %
Lettonie	6 449	17 675	0	24 123	100 %
Chypre	0	9 376	0	9 376	100 %
Estonie	5 804	0	0	5 804	0 %
Malte	0	4 818	0	4 818	83 %
Total UE 28	2 742 837	11 153 985	149 642	14 046 464	92 %

* Estimation. **Pour le Danemark, le biodiesel et le bioéthanol ont été mélangés pour des raisons de confidentialité, le chiffre de la consommation totale contient à la fois le bioéthanol et le biodiesel. ***huiles végétales incluses dans le chiffre du biodiesel. Note : les données de consommation 2015 n'étaient pas disponibles à la date de notre enquête pour la Croatie, la Lettonie, l'Estonie, la Slovaquie, la Bulgarie, la Roumanie, la Slovaquie et la Finlande. Par défaut, Eurobserv'ER a fait le choix de reporter la même consommation de l'année 2014. Source : Eurobserv'ER 2016.

Source : Eurobserv'ER biofuels barometer juillet 2016, <http://www.eurobserv-er.org/biofuels-barometer-2016/>

On distingue trois générations de bio-carburants, mais les définitions ne sont pas clarifiées.

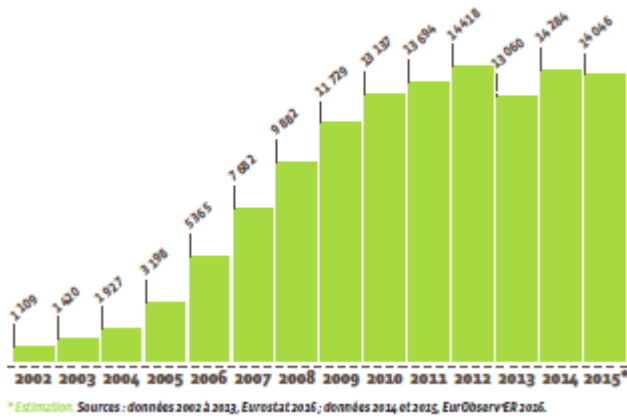
Une distinction possible consiste à définir la première génération comme issue de produits alimentaires, alors que la seconde provient des sources « ligno-cellulosiques » (bois, feuille, paille). Une autre définit la première génération comme celle qui utilise les organes de réserve de la plante, alors que la seconde utilise toute la plante. Pour d'autres, la seconde génération rassemble les déchets agricoles et les plantes qui ne servent pas à l'alimentation humaine.

Les bilans écologiques et effet de serre de ces carburants sont assez controversés, notamment du fait de l'énergie fossile à utiliser dans les engrais ou pour transporter et transformer les plantes. La première génération entre directement en conflit avec l'alimentation humaine et son bilan GES est incertain du fait des intrants énergétiques et matériaux (analyse de cycle de vie), des différentes façons de comptabiliser les sous-produits et des effets indirects des changements d'affectations de terres induits. Le conflit pour la seconde génération de biocarburants est moins aigu, ceci dit il demeure une compétition pour la terre, sauf à utiliser des terres totalement marginales impropres à la culture alimentaire.

De ce fait, l'Union européenne compte réduire le recours aux agrocarburants de première génération, qui ne seront incorporés qu'à hauteur de 7 % en PCI dès 2017 au lieu des 10 % prévus pour 2020, le reste provenant soit de bio-carburants « avancés » ou de l'électricité pour arriver à 10 % d'énergie renouvelable dans les transports. Le graphique ci-dessous montre que la consommation de bio-carburants dans les transports dans l'Union européenne plafonne déjà depuis 2010 environ.

Graph. n° 1

Evolution de la consommation de biocarburants (liquide et biogaz) utilisés dans les transports de l'Union européenne des 28 (en ktep)



Source : Eurobserv'er biofuels barometer juillet 2016, <http://www.eurobserv-er.org/biofuels-barometer-2016/>

La troisième génération utilise des algues, qui seraient très efficaces, sur le plan théorique tout du moins, par rapport par exemple au colza ou au tournesol. Le rendement s'améliore si les micro-algues sont placées dans une atmosphère riche en CO₂, de l'ordre de 13 % par exemple.

Cependant, les coûts de production sont aujourd'hui élevés, de l'ordre de 1 600 euros le baril, soit 10 euros le litre. Ce qui correspond à des coûts d'évitement de la tonne de carbone supérieurs à 4 000 euros.

Le rendement par rapport à l'énergie solaire ne serait que de 1,5 %, certes meilleur que celui des autres agrocarburants, mais nettement moindre que le solaire photovoltaïque ou thermodynamique qui atteignent un rendement de 15 % par rapport à l'énergie solaire.

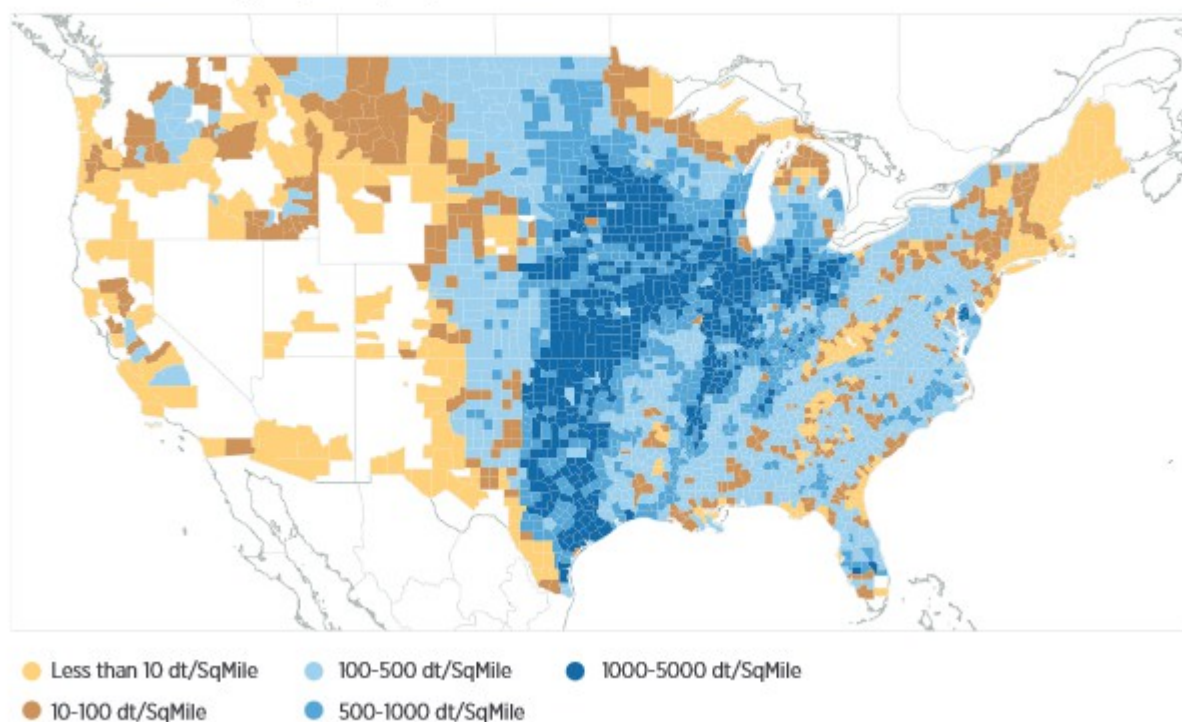
Le Department of energy (DoE) des États-Unis et le « Oak ridge national laboratory » (ORNL) ont produit en 2016 une mise à jour du rapport « billion ton »³⁹ indiquant qu'il serait possible de viser 1,57 milliards de tonnes de bio-masse sèche en 2040 aux États-Unis, sans dommages environnementaux significatifs ni affecter l'alimentation, et ce en visant un coût de 60\$ par tonne (« on the roadside » donc avant le transport et la transformation éventuelle). Ceci correspondrait à 30 % de la consommation de pétrole des États-Unis en 2005.

Deux scénarios (base et haut rendement sont distingués), avec une ventilation par plante et résidu selon les prix de revient. Le miscanthus, le panic (switchgrass) ainsi que les « tiges de maïs » (corn stover) semblent les contributeurs principaux.

³⁹ Billion ton report 2016, DoE et ORNL, <http://energy.gov/eere/bioenergy/2016-billion-ton-report>



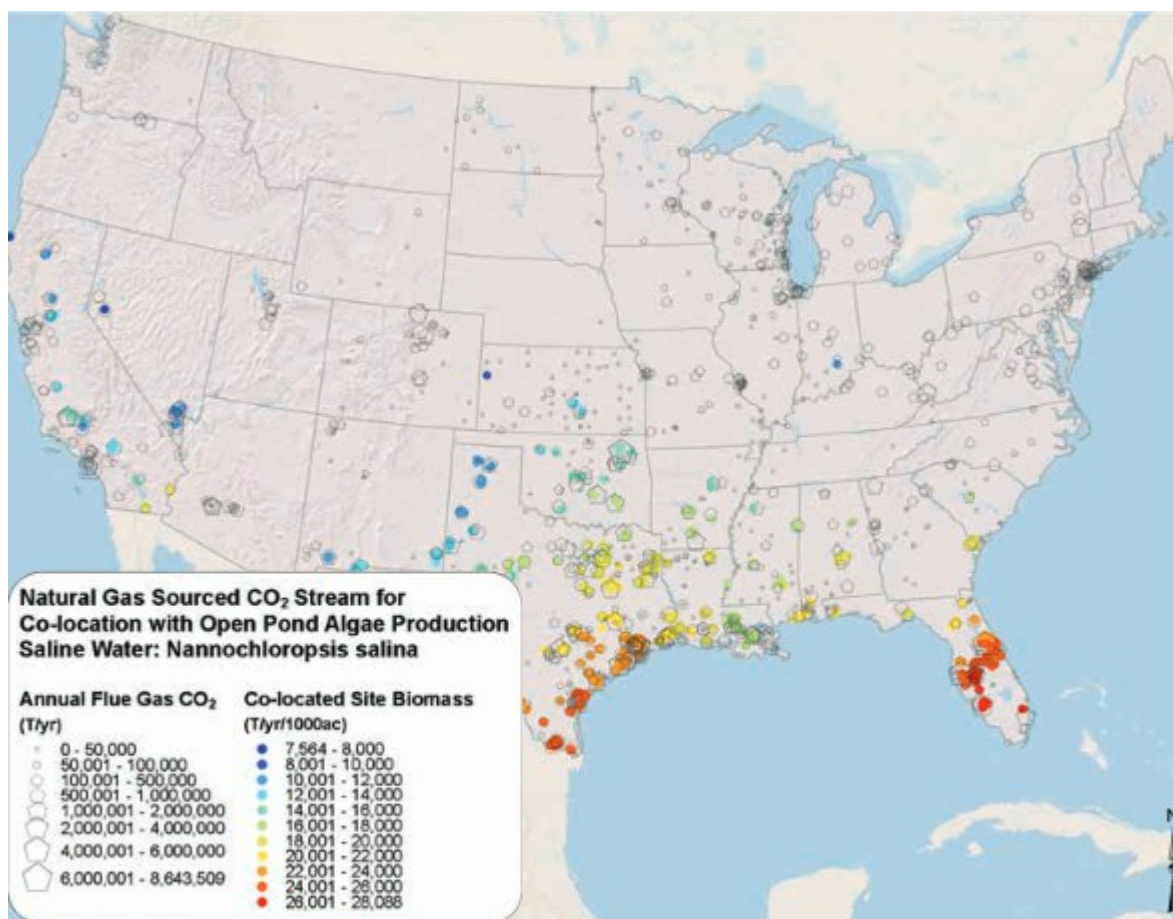
Production of residues and energy crops at an offered farmgate price of ≤\$60 in 2040 under a high-yield (3%) scenario



Source : Billion ton report 2016, DoE et ORNL,
<http://energy.gov/eere/bioenergy/2016-billion-ton-report>

Une analyse fine de la localisation géographique des plantes a été effectuée, comme le montre la carte ci-dessus.

Pour la troisième génération, l'étude imagine colocaliser des fermes d'algues près de centrales à charbon pour bénéficier du CO₂ pour produire cette bio-masse. Une géographisation de ces activités a été esquissée dans la carte ci-dessous.



CO₂ co-location opportunity for coal-fired EGU and algae cultivation using freshwater strain *Chlorella sorokiniana*; colored dots represent co-located biomass potential.

Source : Billion ton report 2016, DoE et ORNL,
<http://energy.gov/eere/bioenergy/2016-billion-ton-report>

Toutefois, le tome 2 du rapport sur la compatibilité environnementale de ces productions n'est pas encore disponible en juillet 2016, et il convient d'attendre pour se prononcer sur le réalisme de cette compatibilité environnementale à une telle échelle.

On notera que les États-Unis disposent d'une surface deux fois plus élevée (9,6 M km²) que celle de l'Union Européenne (4,5 M km²), alors que la population de l'Union Européenne est de 508 millions d'habitants contre 321 M habitants aux États-Unis en 2015. Sans analyser les différences de sol, il semble vraisemblable qu'un continent 3,4 fois plus dense ne peut dégager autant de surface pour des bio-carburants sans entrer en compétition avec la filière alimentaire.

Si l'étude « billion ton » est exacte, on peut cependant faire le calcul très approximatif suivant : si aux États-Unis, la biomasse pourrait représenter 30 % du pétrole, que celui-ci est consommé à 70 % dans les transports dans ce pays, la biomasse y représenterait en 2040 43 % de la consommation de pétrole dans les transports (de 2005), si elle était utilisée uniquement dans les transports.

Compte tenu des densités, en tenant compte des consommations de transport plus importantes aux États-Unis qu'en Europe, le taux de biomasse en Europe ne pourrait toutes choses égales par ailleurs excéder 19 % (=43 %/3,4x19 035 (consommation États Unis en barils/jour 2014) /12 527 (consommation Union européenne en barils par

jour 2014)) de l'énergie dans les transports. Une vingtaine de % sans importations semble donc un ordre de grandeur de ratio plus réaliste dans l'Union européenne si l'on aligne sur l'étude américaine, et ce serait probablement déjà ambitieux.

La densité de population européenne semble assez proche de la moyenne mondiale, cependant les perspectives de motorisations 2050 du FMI se situent à 2,9 milliards de voitures, soit un taux d'équipement de l'ordre de 300 voitures pour 1000 habitants dans le monde en 2050, (pour une population passant à 9,7 milliards) contre environ 500 aujourd'hui dans l'Union européenne. A priori, les pays émergents devraient aussi être demandeurs de bio-carburants, avec une population plus nombreuse qu'aujourd'hui de surcroît, et donc les perspectives d'importation nettes de bio-carburants par l'Union européenne semblent assez limitées en première approche.

2.3.18. Le véhicule à hydrogène ne semble plus poser de difficultés techniques ou de sécurité (véhicule et chaîne d'approvisionnement), mais sa viabilité économique en fait une solution potentielle à moyen terme seulement

Le véhicule à hydrogène utilise l'hydrogène pour sa propulsion. Le moteur peut être à explosion, électrique (dont l'énergie vient d'une pile à combustible) ou bien hybride. On peut également enrichir le carburant (gaz en général) en hydrogène.

L'hydrogène n'est pas présent à l'état naturel, c'est seulement un vecteur énergétique. Il faut donc de l'énergie pour le produire. Si l'énergie consommée à cet effet est carbonée, le bilan n'est manifestement pas bon. Il convient de tenir compte également des risques de fuite en méthane, à très fort pouvoir réchauffant, lors du processus de production, ce qui semble exclure la filière vapo-reformage si l'on cherche une baisse des GES.

Le bilan carbone dépend de nombreux paramètres. Si le mix électrique est presque totalement décarboné, aux heures de production, alors malgré le rendement moindre que pour un stockage électrique, on peut envisager des émissions directes faibles.

C'est aussi ce qui peut en faire un vecteur de stockage crédible sur le plan énergétique (ratio ESOle énergie stockée sur utilisée), pour des surplus de production électrique décarbonée, d'après une étude comparative de 2015 avec des batteries Li-ion, (Pellow et al⁴⁰), du fait de la moindre énergie grise que dans les batteries. Mais les auteurs ne se prononcent pas sur la viabilité économique du dispositif.

Le diagramme ci-dessous va dans le sens d'une plus grande efficacité (puits à la roue) de la solution pile à combustible hydrogène (FCHV, 40 % d'efficacité totale) face au véhicule thermique, et même à la solution électrique (33%), en supposant hydrogène et électricité produits à partir du gaz naturel.

⁴⁰ Hydrogen or batteries for grid storage, a net energy analysis, Pellow et al, Royal society of Chemistry, avril 2015, <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/ee/c4ee04041d>

Comparison of Total Efficiency

6

	Energy pathway	Well-to-Tank 50%	Tank-to-Wheel 50% *1	Well-to-Wheel ¹ 20% 40%
FCHV-adv	Natural gas ↓ Membrane separation reform	67% *2	59%	40%
	Hydrogen (70MPa)			
EV	Natural gas ↓ Gas-fired Power generation	39%	85%	33%
	Electricity			
Gasoline HV (Prius)	Crude oil ↓ Refine	84%	40%	34%
	Gasoline			
Gasoline ICE	Crude oil ↓ Refine	84%	23%	19%
	Gasoline			

*1 Tank-to-Wheel efficiency: measured in the Japanese 10-15 test cycle

*2 Efficiency difference between 35MPa and 70MPa: approx. 2%

(Toyota Calculation)

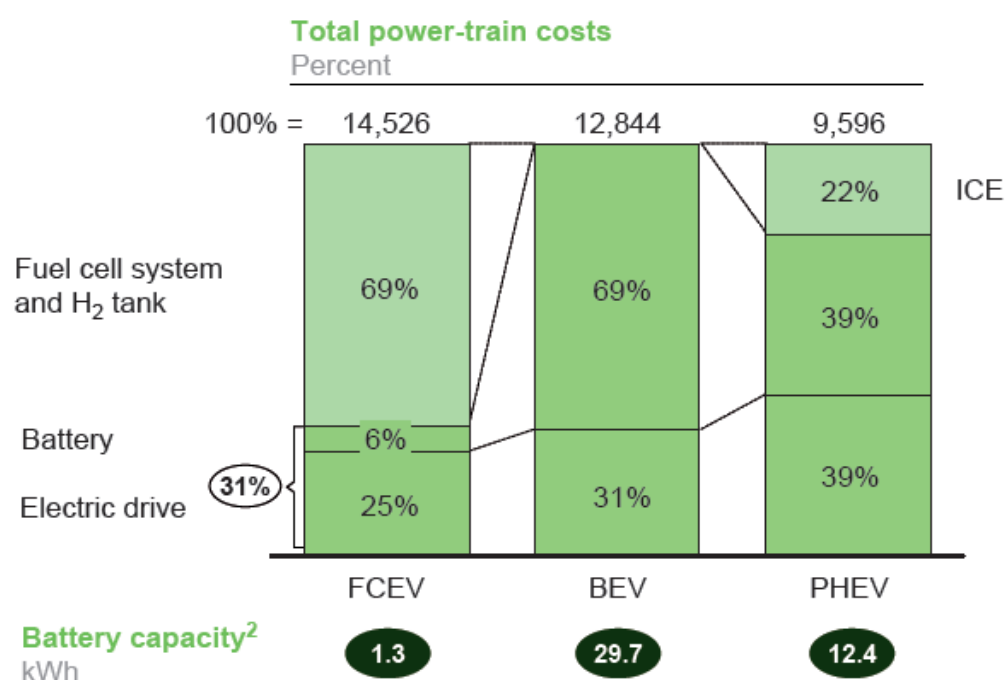
FCHV-adv has great advantage in the Well-to-Wheel efficiency.

Efficacités du puits à la roue pour divers types de véhicules – source,
http://cleancaroptions.com/html/energy_efficiency.html

De plus, comme noté *infra*, les prix de l'hydrogène et de l'essence sont tels que le coût de carburant au km sont approximativement les mêmes pour le moteur thermique et pour la pile à combustible d'un véhicule à hydrogène⁴¹. Il existe par contre aujourd'hui un surcoût important du véhicule à pile à combustible par rapport au véhicule thermique. Il faudrait donc des gains en productivité importants pour obtenir une offre plus économiquement viable, notamment par rapport au véhicule électrique dont la viabilité économique semble plus vraisemblable dans une décennie.

L' étude « a portfolio of power trains in Europe – a facts-based analysis » de McKinsey en 2011 envisage pour 2020 les coûts suivants :

⁴¹ 1 kg d'hydrogène permet de parcourir 100 km, 5 litres d'essence aussi, et l'hydrogène à produire vaut 2-3€/kg, et 8-10€/kg après transport et distribution.



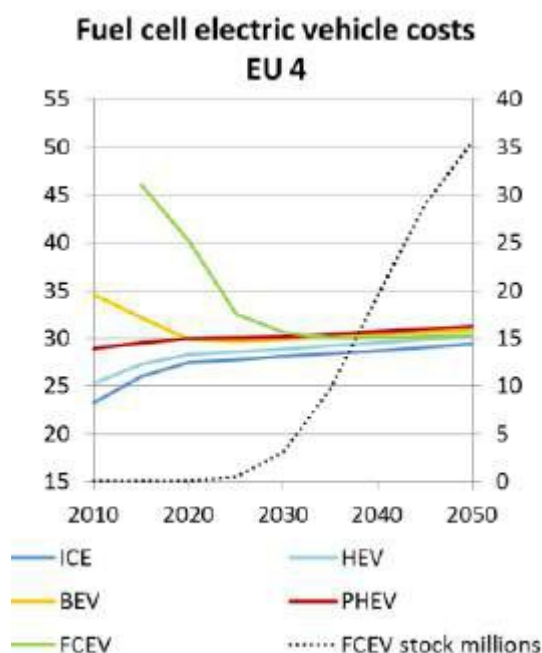
1 All power-trains have different performance criteria, mobility patterns and driving purposes
 2 Different types of batteries for each power-train depending on their driving pattern

SOURCE: Study analysis

Exhibit 23: In 2020, 31 % of technology improvements in BEVs and PHEVs also apply to FCEVs

*Étude « a portfolio of power trains in Europe – a facts-based analysis » ,
 McKinsey 2011,
http://www.iphe.net/docs/Resources/Power_trains_for_Europe.pdf*

Par ailleurs une étude de l'AIE (agence internationale de l'énergie) voit une convergence des coûts d'achats pour les différentes filières vers 2030, sous des hypothèses de déploiement ambitieuses.



Coût d'achat en k\$ (à gauche) et parc automobile en millions (à droite) du véhicule à pile à combustible hydrogène en Europe – Source, « Technology roadmap, hydrogen and fuel cells », AIE, juin 2015,

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf> et

https://www.iea.org/media/freepublications/technologyroadmaps/TechnologyRoadmapHydrogen_Annex.pdf

Un intérêt potentiel à bord d'un véhicule peut être de servir de prolongateur d'autonomie pour un véhicule électrique (offre de l'entreprise française SymbioFuel Celle par exemple). L'on peut d'ailleurs aller au-delà de la simple prolongation d'autonomie et assurer l'essentiel de l'autonomie avec un plein rapide en 4 minutes à 700 bars environ pour 5 kg et 500 km (exemple de la Toyota Mirai). Outre ce modèle, sont commercialisés des Honda Clarity et des Hyundai ix35/Tucson.

Aujourd'hui, il ne semble plus demeurer de problèmes significatifs en matière de sécurité, que ce soit des véhicules, ou de la chaîne d'approvisionnement, ce qui est déjà un pas important franchi.

Le véhicule pourrait être connecté à l'électricité de la maison pour l'alimenter en cas de panne électrique. Il est très silencieux et n'émet pas ou très peu de polluants locaux.

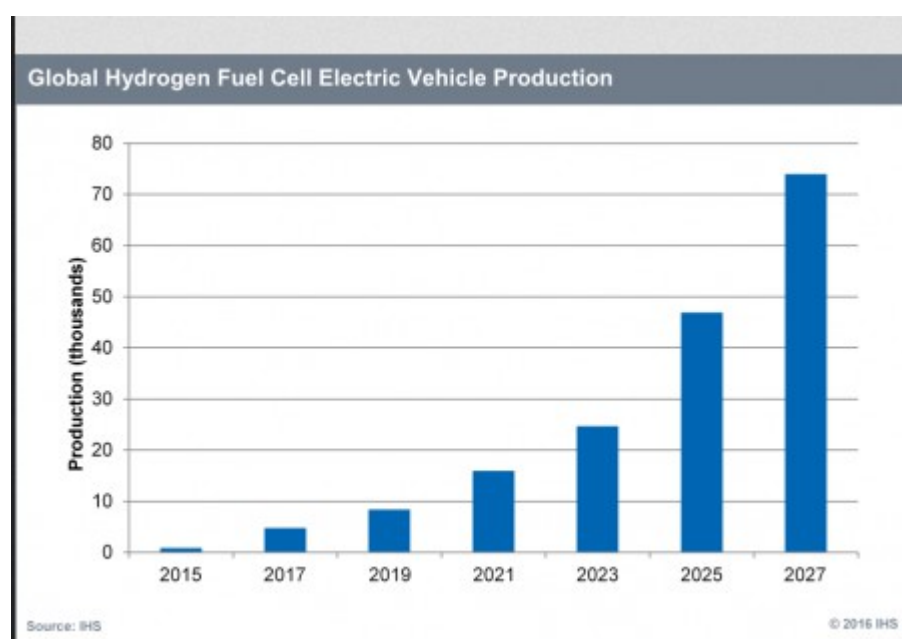
Cependant, le seul coût de la station de distribution serait de 1 à 2 M€, il dépend aussi de la pression de recharge. Le prix à la pompe avoisine 12 euros par kg, soit 100 km (sans TICPE) ce qui est assez proche (au km d'autonomie) du prix à la pompe pour de l'essence à destination d'un moteur thermique. Le véhicule coûterait actuellement 79 200 euros en Allemagne. 1 500 clients auraient acheté ce véhicule (Mirai) au Japon, dont 40 % de particuliers.

Actuellement, le bilan carbone n'est pas bon, à 100 gCO₂/km, avec de l'hydrogène provenant du vapo-reformage, un peu moins qu'un véhicule à essence ou un véhicule diesel ; les véhicules neufs avaient en 2014 un taux de 115 à 125 gCO₂/km selon le CCFA (et 112 g pour le diesel, 115g pour l'essence en 2011 selon l'étude « a portfolio

of power trains for Europe – a facts-based analysis, McKinsey 2011), en dessous de l'exigence UE de 130 gCO₂/km, et l'UE impose un objectif réglementaire de 95 gCO₂/km en 2021.

On pourrait utiliser une production d'hydrogène par électrolyse à partir d'une électricité décarbonée, mais à des niveaux de prix plus élevés sauf utilisation d'électricité excédentaire. En matière d'émissions, l'avenir de l'hydrogène passe cependant, à terme, par cette production décarbonée par électrolyse.

D'après le cabinet IHS, (FCEV report) les perspectives pourraient cependant s'améliorer pour ce type de véhicule, avec 70 000 véhicules produits en 2027, avec des gains de productivité, une réduction du besoin en platine par exemple. Mais cela reste toutefois un marché marginal de moins de 0,1 % du marché des voitures à cette date selon ce rapport. D'autres rapports sont plus optimistes en termes de déploiement (cf. *supra*). De fait, la plupart des projections en la matière sont, ici comme ailleurs, très dépendantes des hypothèses et des valeurs des paramètres utilisés.



Source : FCEV report, cabinet IHS, <http://press.ihs.com/press-release/automotive/global-hydrogen-fuel-cell-electric-vehicle-market-buoyed-oems-will-launch-1>

Le coût de déploiement des premières stations est probablement assez élevé (typiquement de 300k€ à 1M€ selon la pression⁴²), mais il ne renseigne pas sur le potentiel à long terme de cette technologie, car des progrès technologiques et des gains d'échelle sont probables, mais dans des proportions et calendrier incertaines. Un marché haut de gamme peut se développer ; un marché local peut se développer (cf. par exemple les initiatives du département Manche en la matière) ; la directive sur les carburants alternatifs peut amener, de toute façon, à déployer une infrastructure pour les véhicules à hydrogène ; etc.

Si l'on ne vise qu'un déploiement dans pour une flotte de taxis ou VTC dans un petit nombre de villes, une dizaine de stations service est peut-être suffisant. Le coût par plein reste encore élevé, mais pas incompatible avec une action qui ressort plus de la R et D que d'un déploiement. Cela pourrait aussi fournir un débouché à de l'hydrogène

⁴² Source : hydrogène filière énergie, rapport CGEDD-CGE n° 010177-01 de septembre 2015

produite par électrolyse à des heures où l'électricité serait sur-abondante, par exemple en milieu de journée les jours venteux si le solaire devait se développer fortement.

Enfin, quelques véhicules à hydrogène sont d'ores et déjà déployés dans un certain nombre de flottes captives en France : véhicules de La Poste, chariots élévateurs, etc.

L'hydrogène, on l'a vu, est un vecteur énergétique, mais il est aussi un moyen de stockage (voir aussi à ce sujet l'Annexe thématique sur l'énergie). Il n'est d'ailleurs pas non plus la seule solution pour stocker dans un carburant des excès de production d'électricité. Notamment, dans un scénario où, pour éviter de la production d'électricité carbonée lorsque la demande excède l'offre décarbonée, on peut dimensionner le parc de production décarboné au-delà du strict nécessaire, alors on doit assurer des moyens de stocker la production excédentaire en période de creux de demande. Le graphique ci-dessous ne mentionne pas l'approche d'incitation à l'étalement des pointes de demande électrique pour éviter d'avoir à stocker l'électricité produite.

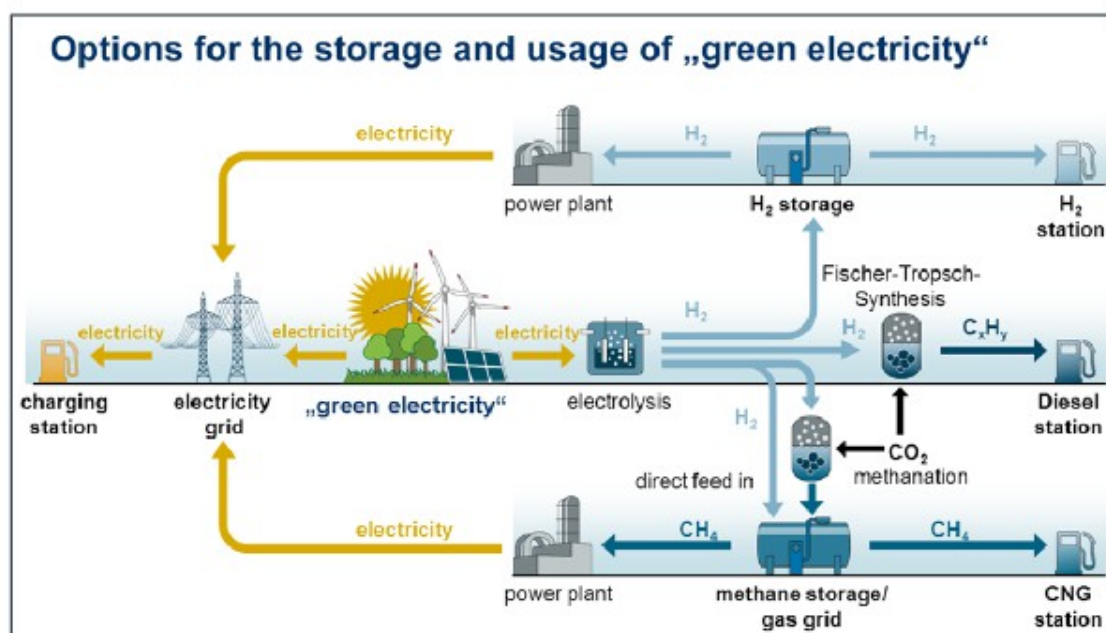


Figure 19: From surplus electricity to fuel; Source: Volkswagen AG

European roadmap, infrastructure for green vehicles, Ertrac, 2012,
http://www.ertrac.org/uploads/documents_publications/Roadmap/infrastructure-for-green-vehicles_final-october-2012_65.pdf

L'activité en matière d'hydrogène a varié de manière cyclique, avec un creux dans les années 2000 et un renouveau depuis 2005 et surtout 2015. Les avis restent partagés⁴³.

Il reste de fortes incertitudes sur la date de viabilité économique de cette filière ; cependant pour les usages où l'autonomie nécessaire est très importante, on ne voit pas de solution décarbonée à grande échelle très évidente ; on ne sait pas bien quelles seront les possibilités offertes en volume et en prix des biocarburants, les échanges de batterie ou recharges rapides sont aussi assez incertains, et donc de ce point de vue, le développement de la filière hydrogène renforce les chances de trouver une solution

⁴³ cf. pour un panorama le rapport conjoint CGEDD-CGE CGEDD n°010177-01 de septembre 2015, portant sur la « filière hydrogène énergie ».

adaptée pour préserver des possibilités de mobilité à longue distance tout en réduisant fortement les émissions de GES afférentes.

2.3.19. Le véhicule à air comprimé, véhicule avec une autonomie limitée mais adaptée à des trajets urbains, mériterait un regard complémentaire

L'air comprimé peut également être une manière de stocker de l'énergie pour un usage transports. Cette technologie a été utilisée au XIXème siècle pour des tramways urbains et locomotives minières, et connaît un regain actuel, sans commercialisation réelle encore⁴⁴. Si la compression de l'air est effectuée sans ou avec peu d'émission de GES, alors cette approche peut aussi constituer une forme de mobilité décarbonée. Le sujet de l'énergie grise semble a priori moins se poser que dans un véhicule électrique.

Avec une station de recharge à haute pression, le plein peut être effectué en 3 minutes. Le plein chez soi paraît plus difficile du fait du bruit induit par le compresseur.

Si ce type de motorisation a été utilisé au XIXème pour des locomotives ou des tramways, elle est largement tombée en désuétude, notamment à cause des enjeux de distance maximale entre recharges⁴⁵.

Cette question d'autonomie semble toutefois progresser ; le constructeur MDI fait état d'un parcours de 80 km, avec une vitesse de 110 km/h sur autoroute.

Des progrès ont lieu également pour ce qui concerne les réservoirs, qui tiennent une plus grande pression (5000 psi, ou encore 30 Mpa ou 300 atmosphères, le psi étant la livre-force par pouce carré ou « pound-force per square inch » (psi), qui vaut 6894.757 pascals ou encore 0,06 atmosphères), d'où une meilleure efficacité énergétique et une meilleure autonomie. La quantité d'énergie par litre (50 Wh/litre à 30 MPa ou 4500 psi) reste cependant inférieure à celle d'une batterie lithium-ion (250 à 620 Wh/litre), ou à l'essence (1700 Wh/l) récupérable avec un rendement de 18 %.

⁴⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_%C3%A0_air_comprim%C3%A9

⁴⁵ Ce qui n'est pas forcément dirimant, par exemple pour des véhicules à arrêts fréquents et proches. Cela vaut pour la technologie des supercondensateurs, qui permettent à des bus de se recharger à chaque arrêt pendant que les passagers montent et descendent

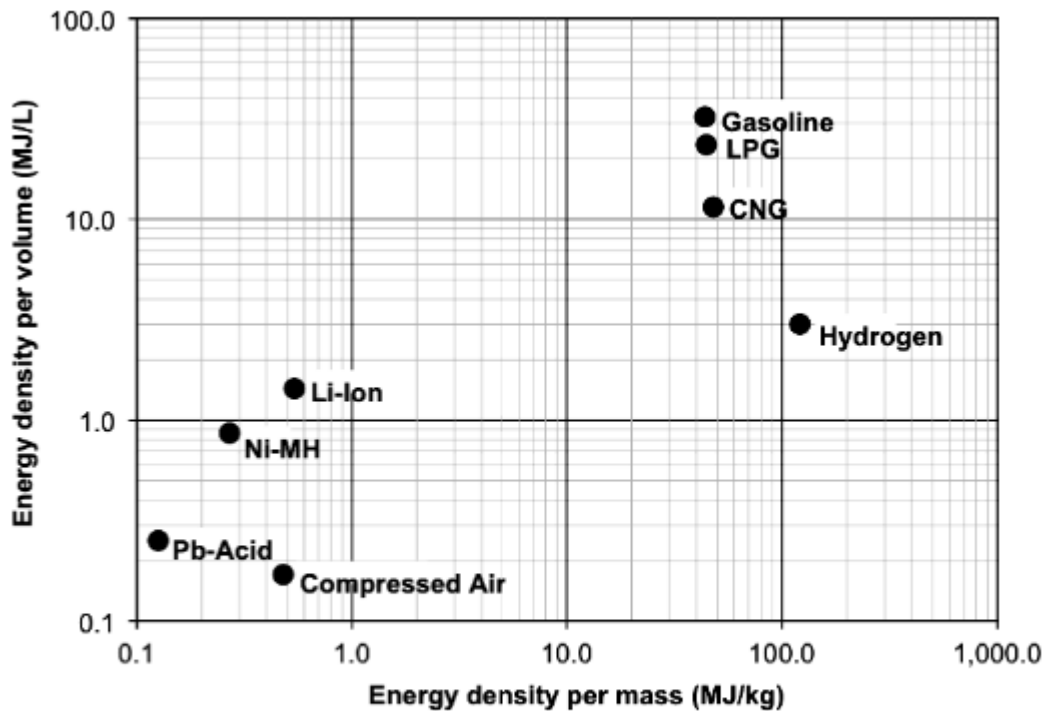


FIGURE 1 Energy density of compressed air and transportation fuels (LPG = liquid propane gas).

Source: *Compressed air vehicles, Drive cycle analysis of vehicle performance, environmental impacts and economic costs, Transportation research record, Papson Creutzig, Schipper* <http://www.mcc-berlin.net/~creutzig/PapsonCreutzigSchipper2010.pdf>

Ce papier est intéressant explique les raisons menant aux pertes d'énergie à la compression et à l'utilisation. Il tente un bilan CO₂ (vf figure ci-dessous), toutefois le scénario bas carbone est lié à un mix électrique d'origine gazière, peut-être volontariste aux États-Unis ou en Allemagne, mais pas en France même en tenant compte des importations d'électricité. Il ne traite pas du sujet de l'énergie grise.

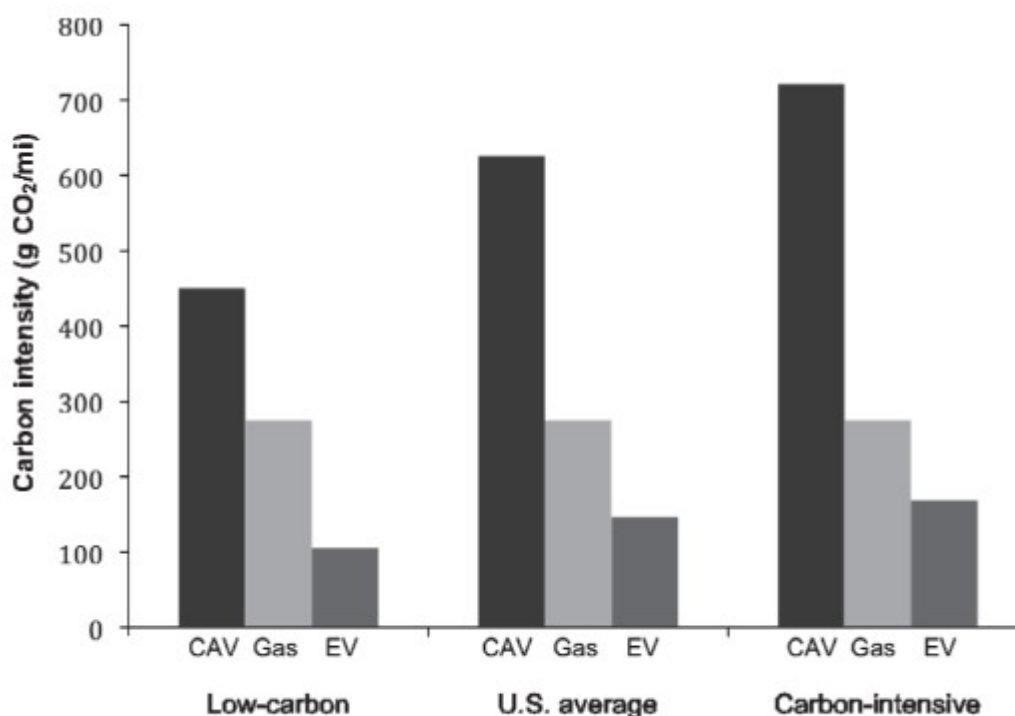
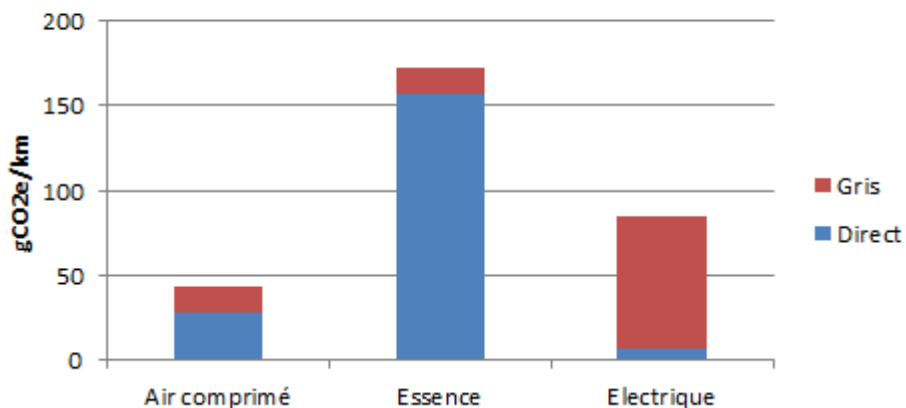


FIGURE 2 Comparison of vehicle carbon intensity across electricity generation scenarios.

Source: *Compressed air vehicles, Drive cycle analysis of vehicle performance, environmental impacts and economic costs, Transportation research record, Papson Creutzig, Schipper* <http://www.mcc-berlin.net/~creutzig/PapsonCreutzigSchipper2010.pdf>

Dans ce graphique « CAV » désigne le véhicule à air comprimé, « Gas » celui à essence et « EV » le véhicule électrique. Le scénario « low carbon » est toutefois à 500 gCO₂/kWh. Si on se situe plutôt autour de 40 gCO₂/Kwh, voire 50 pour tenir compte des importations et faciliter les calculs en ordre de grandeur, en supposant un « smart grid » évitant le chargement d'électricité à la pointe charbonnière, on arrive en première approche, si l'énergie grise du véhicule à air comprimé était du même ordre que celle du véhicule à essence, aux ordres de grandeur suivants :

Emissions directes et grises en mix électrique 50 gCO₂/KWh



Source : Estimations de la mission sur la base de la figure précédente (division par 10 des émissions directes pour le véhicule air comprimé et le véhicule électrique, et estimations de l'énergie grise par ratios), puis conversion des miles en km.

Tout ceci mériterait des analyses plus approfondies, notamment sur le sujet de l'énergie grise.

Il y a une perte d'énergie à la compression, 21 kWh seraient nécessaires pour stocker 2,5 kWh, donc un rendement à la compression de 12 %. Il y a aussi de la perte d'énergie lors du fonctionnement du moteur.

Toutefois, si l'énergie utilisée est décarbonée, elle le reste malgré tout en bout de chaîne. La comparaison avec une motorisation électrique reste à faire.

Pour des autobus, une étude⁴⁶ de l'université de Lund en Suède fait état d'un gain de 60 % de consommation pour un hybride-air.

2.3.20. Le véhicule solaire, une idée pour les zones ensoleillées, qui décentralise la production d'électricité mais à potentiel qui reste limité

Pour des véhicules très allégés, une idée peut être de rouler totalement ou en grande partie avec de l'énergie solaire grâce à un panneau sur le véhicule lui-même.

Un tricycle de moins de 100 kg avec un panneau solaire de 100 W (1 m² typiquement) environ vise une émission nulle de CO₂, avec cependant le besoin pour l'utilisateur de pédaler de temps en temps, ce qui peut apporter aussi des bénéfices du point de vue de la santé. La batterie amène toutefois un sujet d'énergie grise pour le bilan GES comme les véhicules électriques rechargeables.

La solution présente l'avantage d'être décentralisée. Elle est probablement plus adaptée aux pays les plus ensoleillés.

⁴⁶ Air hybrid vehicles could halve fuel consumption in the future, février 2011,

<http://news.bioscholar.com/2011/02/air-hybrid-vehicles-could-halve-fuel-consumption-in-future.html>

Par exemple, l'ELF⁴⁷ à une place de Organic Transit est proposé à partir de 7000 \$. une version plus onéreuse comporte 2 places. D'autres projets existent comme celui d'Evovelo⁴⁸.

Le potentiel reste limité, car le nombre d'utilisateurs qui seraient prêts à pédaler une partie du temps n'est probablement pas très important. De plus, l'allègement très fort du véhicule ne lui permet pas l'accès à la voirie express, et le conducteur n'est pas beaucoup plus protégé en cas d'accident avec des véhicules traditionnels que dans un deux-roues.

Peut-être cependant une solution appropriée dans des espaces où les véhicules traditionnels ne seraient pas autorisés, par exemple un campus.

2.3.21. Le transport routier de marchandises

2.3.21.1. Le cas des petits VUL est semblable à celui des voitures particulières

Pour ce qui concerne le transport de marchandises, plusieurs segments sont à considérer. Celui des petits véhicules utilitaires légers alias VUL (en dessous de 3,5 tonnes) ne diffère pas fondamentalement de celui des voitures particulières.

L'Union européenne a adopté une législation limitant les émissions des VUL⁴⁹. Pour 2017, la limite s'établit à 175 g CO₂/km. Pour 2020, elle s'établit à 147 gCO₂/km.

En 2014, la moyenne des émissions des VUL neufs vendus était de 169,2 g/km.

2.3.21.2. Tracteurs routiers et camions : motorisation hybride

Pour les tracteurs routiers et les camions, une possibilité à court moyen terme réduisant les émissions de GES est la motorisation hybride. Par exemple le Renault Midlum (2014) permet une conduite de 60 km en électrique et une autonomie globale de 400 km en diesel, permettant une réduction globale de GES de 30 % par rapport à un diesel équivalent (sur mix français, et sans tenir compte des GES émis lors de la fabrication et du démantèlement). Renault a testé également un camion 100 % électrique Renault Trucks D, adapté à la livraison urbaine en 2014. Il existe des modèles équivalents chez d'autres constructeurs.

Pour des véhicules ne nécessitant pas des autonomies importantes, la solution électrique est également intéressante.

Au-delà des GES, le silence et la forte réduction de la pollution locale sont des avantages appréciés par les riverains en milieu urbain, notamment pour les circulations de nuit et au petit matin.

⁴⁷ ELF <http://organictransit.com/>

⁴⁸ Evovelo <http://www.evovelo.com/en/mo.php>

⁴⁹ http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vans/index_en.htm

2.3.21.3. Tracteurs routiers et camions : autoroute électrifiée

À noter aussi les projets d'autoroute électrifiée. Un premier tronçon d'autoroute électrifiée a été inaugurée en Suède en 2015, impliquant notamment Siemens et Scania. Un projet similaire de Siemens et Volvo concerne des hinterlands de ports en Californie.



Source : Siemens builds first electric highway in Sweden, juin 2015

[http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2015/mobility/pr2015060246moen.htm&content\[\]=MO%29](http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2015/mobility/pr2015060246moen.htm&content[]=MO%29)

Le succès de ce type de dispositif passe nécessairement par une cohérence des investissements fixes et de ceux des véhicules en termes de motorisation. Il faut probablement que l'investissement sol, au moins sur un réseau noyau, précède les investissements en véhicules adaptés. Une évaluation économique a été tentée par le CGDD, mais elle reste très prospective et très dépendante des scénarios de montée en puissance des PL hybrides et électriques.

2.3.21.4. Tracteurs routiers et camions : recharge au sol

Une variante pourrait être une recharge par le sol, peut-être plus adaptée à des véhicules légers.

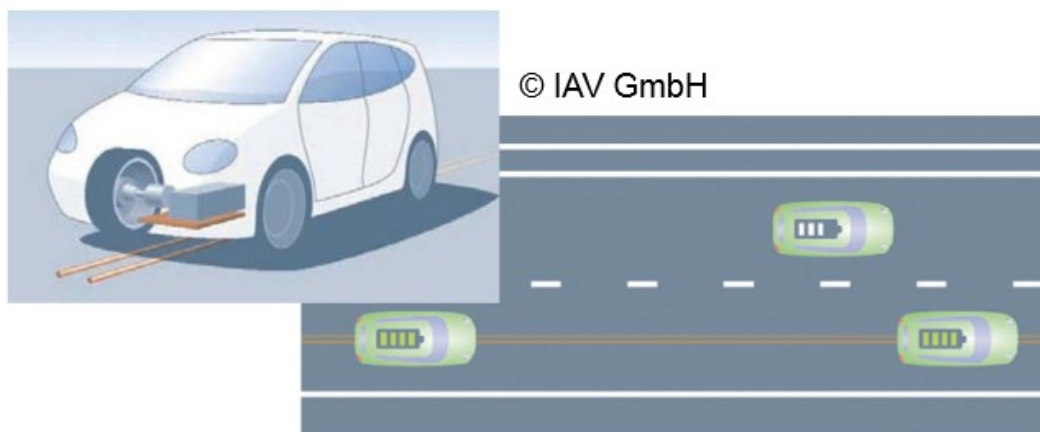


Figure 13: Vision of road integrated charging (Source: Martijn van Walwijk, Secretary General IA-HEV)

Source : Infrastructure for green vehicles, Ertrac, 2012

http://www.ertrac.org/uploads/documents_publications/Roadmap/infrastructure-for-green-vehicles_final-october-2012_65.pdf

Si les PL restent avec des moteurs traditionnels ou à gaz, cette infrastructure ne sert pas à grand-chose. Si les PL passent en masse à l'électrique avec des batteries apportant l'autonomie nécessaire, elle ne sert pas à grand-chose non plus. Il en va de même si des systèmes d'échange de batteries peuvent être proposés à coût et temps d'attente raisonnables.

En revanche, si la flotte de PL migre vers un taux important d'hybrides rechargeables, pendant quelques décennies ce système peut être intéressant, le temps d'une transition énergétique plus aboutie.

2.3.21.5. Tracteurs routiers et camions : gaz naturel éventuellement hybride

Pour les tracteurs routiers et les camions, le choix émergent d'ici 2030 devrait être celui de la motorisation au gaz naturel.

Dans les dix prochaines années, il semble qu'une partie significative de la flotte de poids lourds pourrait basculer vers le gaz naturel (GNV, dont GNL et GNC) peut-être de l'ordre de 30 % d'ici 2030.

Pour les tracteurs routiers, dont l'utilisation est intensive et où les besoins d'autonomie sont importants, le gaz naturel liquéfié (GNL) semble intéressant pour l'utilisateur. Pour les camions, dont la circulation est nettement moins intensive en général, le GNC (gaz naturel comprimé) semble plus approprié.

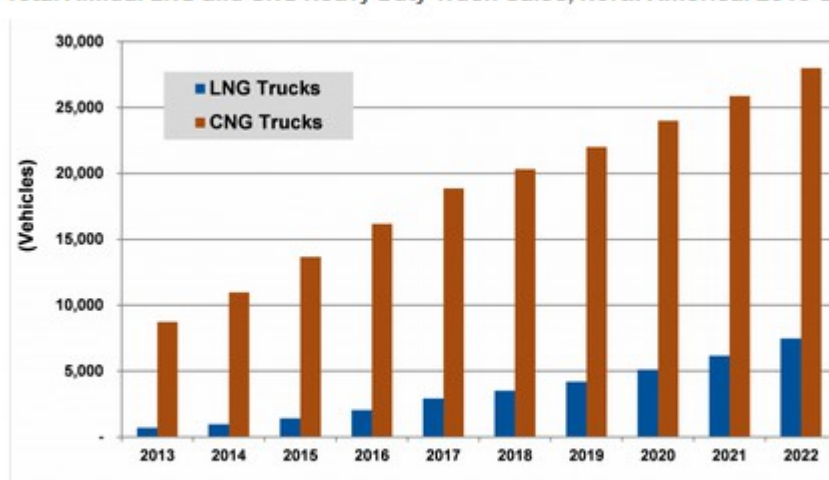
L'intérêt principal est la réduction très forte de la pollution locale de l'air et du bruit, par rapport à des motorisations diesel. Pour ce qui concerne les GES, il y a aussi un gain, mais assez petit, qui serait de l'ordre de 0 à 10 %.

Il est bien sûr possible de renforcer cet effet en incorporant des bio-gaz dans le GNV.

Le surcoût serait de l'ordre de 45 k€ par poids-lourd. La durée de détention pour rentabiliser ces surcoûts serait de l'ordre de 4 ans, ce qui serait encore un peu bref. Ceci étant, cela montre qu'avec quelques légers gains de productivité, le point de basculement pourrait ne pas être très loin. Évidemment, il faudrait aussi un réseau de stations services en GNC plus développé qu'aujourd'hui, avec au moins 1 000 stations en France. Par contre, pour le GNL, l'autonomie à bord est très importante, et donc le réseau de distribution peut être assez limité pour l'instant.

Le graphique ci-dessous montre une prévision de développement de ce marché des PL au Gaz naturel en Amérique du Nord. Une partie pourrait utiliser du gaz naturel liquéfié (GNL, LNG en bleu sur le graphique). Le gaz naturel liquéfié, quoique plus cher en général, réduirait les temps (et donc les coûts de personnel) à la recharge, et il pourrait être intéressant là où il est déjà présent (par exemple près des ports accueillant des méthaniers). Si on suppose un marché annuel dans cette région de l'ordre du million de camions, on arriverait à 3,5 % des ventes en 2022.

Total Annual LNG and CNG Heavy Duty Truck Sales, North America: 2013-2022



(Source: Navigant Research)

Source : For truck, LNG vs CNG debates rages on, navigant research, avril 2014 , <http://www.navigantresearch.com/blog/for-trucks-lng-versus-cng-debate-rages-on>

Pour les tracteurs routiers et camions, se pose en général la question de l'autonomie, l'essentiel de l'usage étant en interurbain avec des trajets qui peuvent être longs. De ce fait, une offre entièrement électrique ne semble pas viable sur ce marché, pour l'instant en tout cas, du fait du volume des batteries qui seraient nécessaires, qui viendrait réduire fortement la charge utile du camion, et donc sa productivité.

On voit cependant apparaître sur le marché très prochainement une offre hybride ; par exemple celle de « Nikola One » avec motorisation électrique (batterie de 320 kWh) avec énergie primaire en gaz naturel (GNC) permettant une autonomie de près de 2 000 km. 7 000 PL auraient été déjà commandés à un prix unitaire à partir de 375 K\$ (ou un loyer de 5 000 \$ par mois). La plus grande capacité du camion améliorerait également son intérêt économique ainsi que sa plus forte accélération et sa puissance développée, notamment pour les rampes à gravir. La consommation affichée ressort à 12 à 16 litres au 100 km (ou 15 à 20 mpg, miles per gallon).

Toutefois, même en supposant que le GNV ne soit pas taxé, l'économie sur le carburant (ainsi que celle sur la maintenance probablement un peu moins chère) ne

permet pas encore de payer le surcoût à l'achat. Dans les conditions du modèle de coût CNR (porteur régional, vie de 6,2 ans en première main, 87 k€ de coût d'acquisition, 25 litres au cent km, 72 000 km/an) et une hypothèse de prix du GNV à 0,45 euros par litre, la différence de coût sur le cycle de vie du camion serait de 90 k€, contre une différence de coût d'acquisition de 250 k€ environ.

L'utilisation de l'électricité, pourvu qu'elle soit essentiellement décarbonée, pourrait réduire l'empreinte carbone ; le freinage régénératif et la motorisation gaz permettrait de réduire un peu le CO₂ émis par rapport au gazole (du fait de l'usage du gaz) et la pollution locale de l'air. A terme, une partie du gaz pourrait provenir de biogaz (ou d'adjonction d'hydrogène) produit lors d'un excès de production de renouvelables, injecté dans le gaz naturel, et ainsi faire baisser encore le taux de GES émis.

2.3.21.6. Tracteurs routiers et camions : biocarburants et biogaz

Le recours aux bio-carburants (et biogaz en motorisation GNV), sous réserve de leur disponibilité en quantité suffisante sans entrer en compétition avec l'alimentation, ce qui suppose la viabilité de la troisième génération (algues), le transport routier de marchandises étant loin d'être négligeable.

Ou bien on peut aussi recourir à du carburant de synthèse produit à partir de CO₂ et d'hydrogène H₂ (ce dernier issu de l'électrolyse alimentée par des surplus électriques décarbonés), selon le procédé de Fischer Tropsch⁵⁰. Ce processus nécessite une catalyse dont les performances sont croissantes, et permet ainsi la capture de CO₂ (dans les sources fixes) pour générer un carburant de synthèse.

L'hydrogène pourrait être une solution pertinente dans un avenir au-delà de 2025-2035.

2.3.22. L'électrification des autobus urbains est faisable dès 2025, et des autocars de lignes sur trajets de moins de 300 km un peu plus tard vers 2030

Pour les autobus urbains, les contraintes liées à l'espace à bord sont assez proches de celles des poids-lourds. En revanche, les possibilités de recharge électrique sont beaucoup plus faciles et planifiables. Les temps de recharge n'imposent pas la présence du conducteur à proximité, à la différence d'un usage interurbain. Du coup, l'électrification de la flotte de bus urbains est nettement plus aisée.

Ainsi, le plan bus de la RATP⁵¹ se fixe comme objectif (avec le soutien de l'autorité organisatrice STIF) 80 % de bus électriques à 2025, le reste étant à motorisation à bases de carburants renouvelables comme le bio-gaz. Compte tenu des coûts attendus de plus en plus faibles pour les batteries et donc du bus électrique (qui reste à 500 k€ en 2015 deux fois plus cher qu'un bus standard), le pari industriel paraît assez raisonnable, avec des surcoûts somme toute maîtrisés pour l'opérateur, qui bénéficiera d'économies d'exploitation liées aux carburants érudés. Les autobus auront une autonomie de 180 km, avec recharge en centre bus la nuit. Leur chauffage pourrait

⁵⁰ Catalytic reduction of CO₂ by H₂ for synthesis of CO, methanol and hydrocarbons: challenges and opportunities, Energy and environmental science, Marc Porosoff, Binhang Yan et Jinguang Chen, issue 1, 2016, Energy Environ. Sci., 2016,9, 62-73, <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ee/c5ee02657a#ldivAbstract>

⁵¹ Bus 2025, en route pour la mobilité durable, RATP <http://scope.ratp.fr/grand-angle/bus2025-en-route-vers-la-mobilite-durable/>

être aux bio-carburants pour ne pas limiter l'autonomie des batteries. Une première ligne 100 % électrique doit être testée dès 2016.

Pour des autocars de ligne interurbains, l'électrification semble un peu plus complexe dès lors que l'autonomie des batteries serait plus courte que la longueur de la ligne. Elle est probablement toutefois envisageable en deçà de 200 puis 300 km environ à des coûts raisonnables, un peu plus tard, vers 2030 pour des véhicules neufs. Pour des trajets plus longs, une prolongation d'autonomie peut-être apportée par des bio-carburants ou du bio-gaz, ou bien bénéficier de l'électrification des grands axes si elle était mise en place.

2.3.23. La réglementation européenne sur les émissions des PL

La commission européenne propose comme première étape de suivre les consommations des PL, et de certifier ces consommations et de publier les résultats correspondants. Elle a mis en consultation en juillet 2016 une proposition de réglementation en ce sens.

Plus tard, la Commission annonce comme mesures possible des limitations de consommation, une différenciation des péages en fonction des consommations, des taxes sur les véhicules tenant compte des consommations, des formes d'énergie alternatives.⁵²

2.3.24. Le transport maritime et le transport fluvial présente des possibilités raisonnables avec les biocarburants et le recours complémentaire à l'énergie du vent

Le transport maritime international représentait en 2005 environ 10 % des émissions de CO₂ dans les transports par combustion dans les transports au plan mondial (source IEA).

En 2015, en France, la part du maritime et du fluvial dans les consommations de carburants pétroliers ressortissait en France à 3,6 % (source CCTN), probablement du fait d'un secteur de transports terrestres plus développé que la moyenne mondiale.

L'IMO (International Maritime Organisation, en français OMI) attend une multiplication par 2,2 à 3,1 des émissions de GES du transport maritime entre 2007 et 2050 dans un scénario de base sans mesures, soit 1,9 % à 2,7 % en moyenne annuelle.

Les consommations de carburants et donc les émissions de CO₂ par tonne-km en première approche sont nettement plus faibles dans le transport maritime que dans la plupart des autres modes, par exemple de l'ordre de 7 fois moins entre un porte-conteneurs de 3700 EVP (équivalent vingt pieds, soit un conteneur de 38,5 m³) et un tracteur routier typique (et 77 fois par rapport à un avion cargo de type B-747-400)⁵³.

Selon l'OMI (organisation maritime internationale, en anglais IMO), le remplacement des moteurs pourrait réduire les émissions de CO₂ de 5 % à 30 % pour les nouveaux navires et de 4 % à 20 % pour les anciens.

⁵² http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/index_en.htm

⁵³ Source données NTM de container shipping information service

Le recours aux bio-carburants, s'ils sont disponibles en quantité adéquate ne pose pas de problèmes spécifiques significatifs dans les modes maritimes et fluviaux (ainsi que pour les opérations portuaires) différents du mode routier. Le cargo « Meri » a par exemple circulé à 100 % avec des bio-carburants.

Sur les plus gros navires, le sujet de la capture du carbone devrait également être pris en considération, à la différence de la plupart des autres modes dont les tailles unitaires sont plus petites.

Le recours à l'électricité dans le transport maritime paraît cependant en général très difficile compte tenu des distances parcourues. Il y a probablement davantage de possibilités dans le fluvial, avec des points de recharge rapide le long des plus grands axes en tout cas. Il y a également des possibilités pour des ferries ou passages d'eau sur des courts trajets, de l'ordre de 20 minutes, avec des stations de recharge, comme le « Arg Vag Tredan » de l'agglomération de Lorient (en partenariat avec STX) depuis 2013, ou dans des dessertes d'îles en Norvège occidentale.

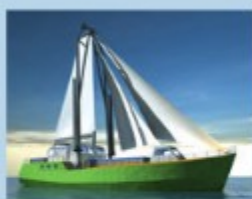
Le recours au gaz naturel (liquéfié si le besoin d'autonomie est conséquent) est possible. Sur le plan du CO₂, il réduit les émissions de GES de 0 à 10 % par rapport au recours au pétrole. Toutefois, en cas de fuites à la production, à la distribution ou à bord, mêmes faibles, l'importance du coefficient de réchauffement global du méthane (25 à 100 ans par rapport au CO₂) amène à être prudent dans ce domaine. Pour un méthanier cependant, la récupération des fuites de méthane pour la propulsion du navire présente cependant à l'évidence un bilan très positif, à la fois du point de vue du carbone issu du pétrole évité pour la propulsion, mais aussi des réductions de fuites de méthane.

On note aussi dans le transport maritime la possibilité de recourir à l'énergie apportée par le vent, sous différentes formes (voiles -soft-sails, fixed-sails, kite sails-, rotors de Flettner, turbines à vent), avec des cas concrets d'implémentation en 2015 dans la totalité des formes énoncées sauf les turbines à vent⁵⁴. D'après OCIUS, l'ajout d'une voile motorisée peut réduire la consommation de carburants, et donc les émissions de CO₂ de 20 à 25 % pour des flux « cross-equator » et de 30 à 40 % pour des flux dans le même hémisphère, avec un retour sur investissement de l'ordre de 2 ans. La solution des rotors est plus adaptée aux petits et moyens navires (jusqu'à 60 % de réduction de CO₂) qu'aux plus gros (19 % de réduction pour un gros pétrolier)⁵⁵. La seule difficulté majeure peut provenir des coûts de transaction entre le propriétaire du navire et son opérateur.

⁵⁴ Source : Irena, International Renewable Energy Agency

⁵⁵ Source : Irena

Figure 2: Examples of ship designs deploying soft-sail technology



(a) Greenheart



(b) B9



(c) Ecoliner



**(d) Seagate
delta wing sail**

Printed with permission from Greenheart Project, B9 Shipping, Dykstra Naval Architects and Seagate

Source Irena

Figure 3: Fixed wingsail designs



(a) UT Wind Challenge



(b) Oceanfoil

Printed with permission from the UT Wind Challenger Project, EffShip Project and Oceanfoil

Source Irena

Figure 4: Ships using rotor sail (Magnus Effect)



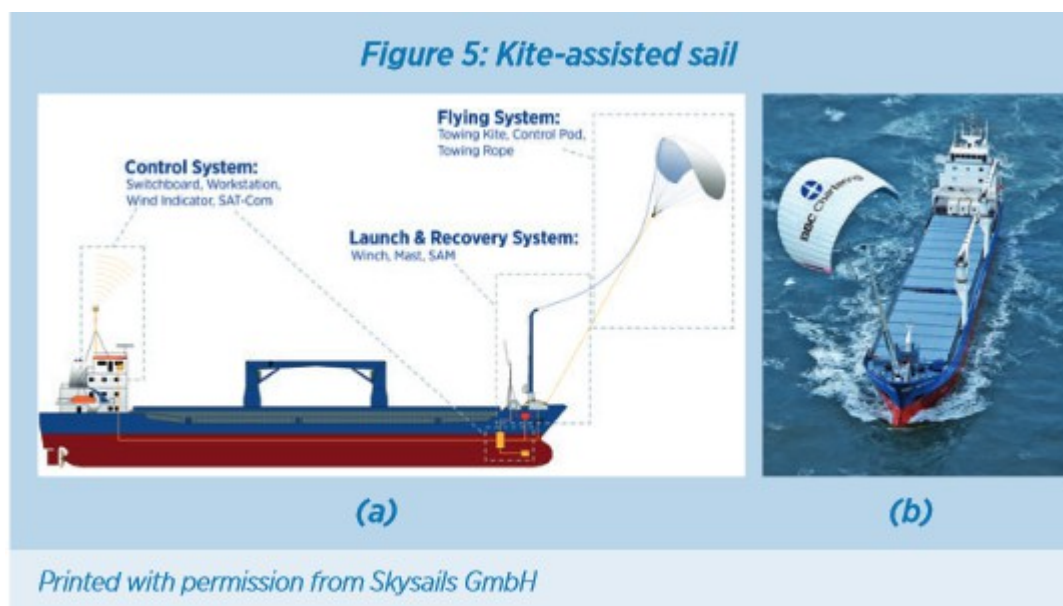
(a) Alcyone



(b) E-Ship 1

Printed with permission (a) – by David Merret, CC BY 2.0; (b) – by Carschten, CC BY-SA 3.0 DE

Source Irena



Source Irena

On peut aussi ajouter un panneau photovoltaïque ou de chauffage solaire de l'eau sur le navire, mais l'effet est nettement plus faible que celui du vent.

La réduction de vitesse de 10 % amène une réduction de consommation de 19 %⁵⁶ et donc aussi des émissions de CO₂. Elle est couramment utilisée par le transport maritime lorsque les prix du pétrole sont élevés, et lorsque les conditions de marché le permettent. Le tableau ci-dessous montre une économie de 11 % de CO₂ entre 2008 et 2010 liée à cet effet de « slow steaming ».

Impact of slow steaming on CO₂ emissions by trade (2008, 2010)^a

	Number of services	% services slow steaming	Mean size in TEU	CO ₂ emissions in 000 tons	% 2010/2008
Multi-trade	63	57.1	5,994	47,500	-16.5
Europe/Far East	28	78.6	7,720	12,900	-16.4
Asia/North America	52	42.3	5,142	29,400	-9.7
Europe/North America	22	22.7	3,469	5,778	-6.7
Australasia/Oceania	17	23.5	3,490	6,275	-4.1
Latin America/Caribbean	73	20.5	2,823	16,200	-4.8
Middle East/South Asia	87	23.0	3,802	22,900	-6.7
South/East Africa	16	31.3	3,007	5,460	-5.9
West Africa	29	20.7	2,106	4,510	-9.1
Total	387	35.4	4,485	150,921	-11.2

^a Table 3 in Cariou (2011) based on Alphaliner database (January 2010).

Source : P. Cariou, Euromed 2011

⁵⁶ Pierre Cariou, les enjeux stratégiques du « slow steaming », 2011, euromed management.

Des économies d'échelle peuvent également être permises par des alliances, du reroutage, mais dans des proportions non calculées.

Au total selon la seconde étude « GHG » (Greenhouse gases, en français GES gaz à effet de serre) de l'IMO, des réductions d'émissions unitaires de 75 % seraient possibles dans le transport maritime à terme, en combinant les diverses solutions énoncées ci-dessus. Si on combine avec une croissance des tonnes-km de l'ordre d'une multiplication par 2,6 (milieu de fourchette) d'ici 2050, on obtiendrait une réduction en gros d'un tiers des émissions du secteur maritime.

À ce stade, la première priorité fixée par la réglementation européenne MRV (*monitoring reporting verification*, en français : suivi, rapportage, vérification) est la mesure des émissions de GES des navires, en commençant par les plus gros, qui constitue un préalable indispensable avant d'aller plus loin⁵⁷.

2.3.25. Le transport ferroviaire et les tramways sont déjà très décarbonés, mais l'usage des bio-carburants semble approprié pour traiter la traction thermique

Le transport ferroviaire est d'ores et déjà largement électrifié en France, avec environ 80 % des équivalents tonne équivalent pétrole ou TEP (avec ratio de 1000 GWh = 0,086 TEP).

Sur la partie électrique, en France, compte-tenu de l'importance de la production nucléaire et hydraulique, le mode est largement décarboné. On note toutefois que la pointe d'usage du ferroviaire se situe à la pointe du matin et à celle du soir. Cette dernière coïncide souvent en hiver le soir avec la pointe de demande d'électricité, et donc, les jours sans vent notamment, aux importations d'origine étrangère potentiellement charbonnière.

Pour les circulations thermiques, qui représentent par exemple un peu moins de la moitié des parcours des trains régionaux, le plus souvent sur des lignes à faible trafic, les coûts de l'électrification sont très élevés, ce qui n'incite pas, sauf exceptions à recommander l'électrification. En revanche, l'incorporation de plus en plus significative de bio-carburants semble une solution ne présentant pas de difficultés techniques particulières significatives dans le mode ferroviaire par rapport aux autres modes et au mode routier.

2.3.26. Le transport aérien est un objet majeur de préoccupation, et surtout le transport aérien international

2.3.26.1. Une contribution aux émissions probablement sous-estimée

Le transport aérien représente au format 3,44 % des émissions de gaz à effet de serre des transports en France en 2015, selon le format SECTEN.

Toutefois, celui-ci n'inclut que les 4,7 Mt CO₂ éq du transport aérien intérieur en 2015, alors que le transport international atteint 16,7 Mt CO₂ éq en 2014. Le transport aérien représente donc plutôt 14,3 % des émissions des transports si l'on inclut l'aérien

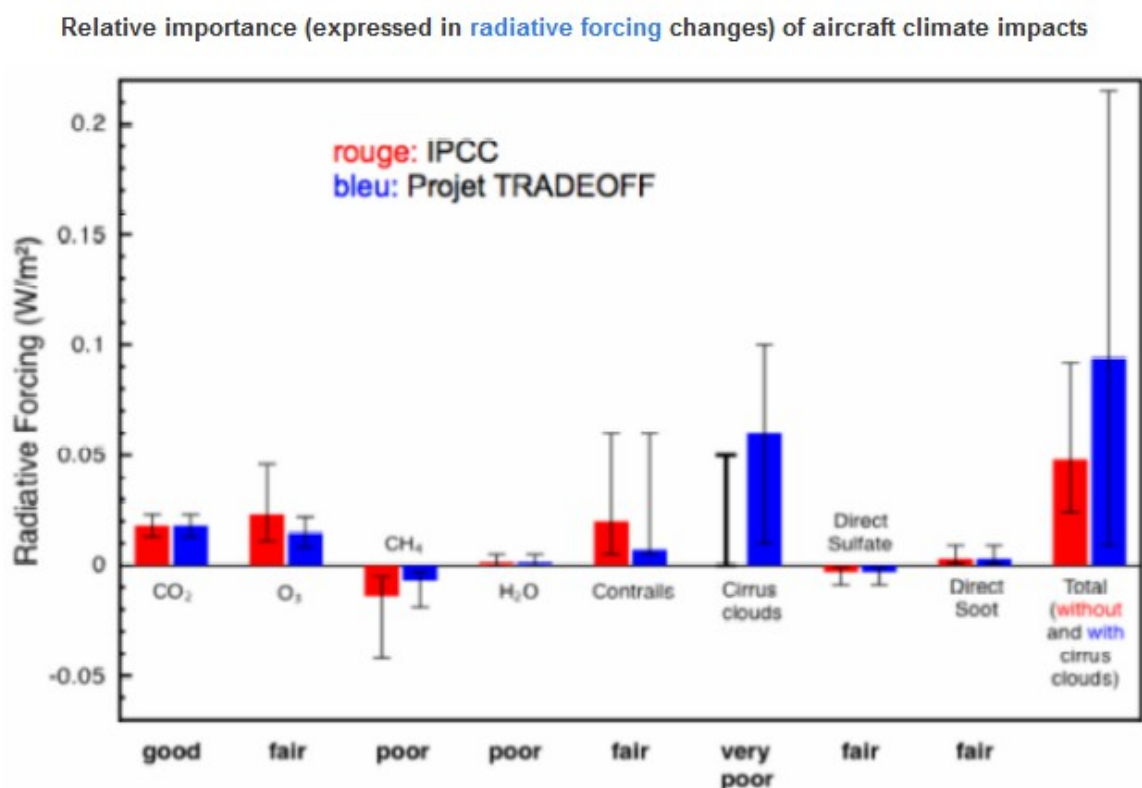
⁵⁷ <http://unctad.org/fr/pages/newsdetails.aspx?OriginalVersionID=132>, UNCTAD, Maritime transport and the climate change challenge, 2009, revised 2012; http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Tech_Brief_RE_for_%20Shipping_2015.pdf, Irena, renewable energy options for shipping, janvier 2015

international, dont la croissance supposée est de 2,2 % des émissions de CO₂ entre 2014 et 2015. Ceci est assez cohérent avec la part du transport aérien dans les consommations de carburants pétroliers en 2015, qui se situe à 14 %.

De plus le pouvoir réchauffant global du transport aérien est plus élevé, du fait de la localisation en altitude des émissions. Il conviendrait de retenir un facteur multiplicatif entre 2 et 4 (hors effet sur les cirrus), contre à peu près 1,5 pour les autres activités liées au transport aérien.

Il semblerait que ces coefficients puissent fluctuer très significativement selon les situations météorologiques locales (humidité de l'air par exemple), ce qui ouvrirait la voie à une réduction du pouvoir réchauffant global par des changements locaux de route, mais ce domaine reste encore très incertain.

Le diagramme ci-dessous illustre les incertitudes très fortes à ce sujet, où les connaissances scientifiques restent émergentes.



Source : Schumann 2005, "Formation, properties and climatic effects of contrails", Comptes Rendus Physique 6 4-5, 549-565

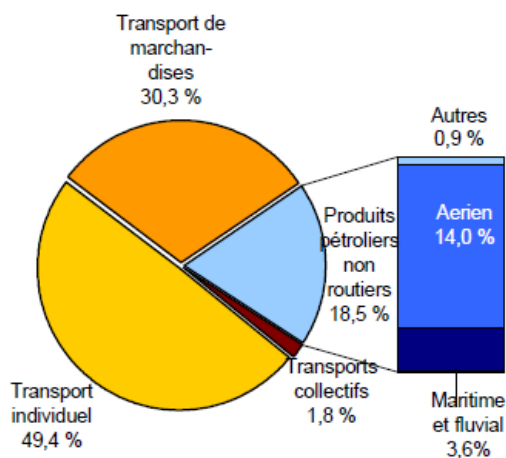
Aviation and the Belgium climate policy, integration option and impacts, Belgium science policy.

http://dev.ulb.ac.be/ceese/ABC_Impacts/glossary/sheet_climate_aviation.php

Le sujet des émissions des GES du transport aérien donc en tout cas loin d'être négligeable, mais entaché de fortes incertitudes.

Figure D2-4 Répartition des consommations de carburants pétroliers en 2015

en % des tep



Source : SOeS

Source : CCTN 2015

2.3.26.2. Des améliorations plus que compensées par la croissance du trafic, voire effaçant les améliorations des autres segments du secteur des transports

Des progrès ont certes été effectués en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le transport aérien par voyageur-km. Là où il y avait plus de 170 gCO₂ /voy-km en 1990, il n'y en a plus qu'un peu plus de 100 en 2015, ce qui correspond à une baisse de 1,5 % par an en moyenne de ce ratio.

La situation du transport aérien du point de vue des GES reste toutefois préoccupante, car la croissance des flux y est très forte.

Ainsi, « les émissions de transport aérien international (16,3 millions de tonnes de CO₂) représentent 76% des émissions totales du transport aérien en France et sont, en progression de 12,4% par rapport à 2000 (14,5 millions de tonnes), pour un trafic en croissance de 53% en termes de passagers-kilomètres-transportés » ; et la croissance des émissions de CO₂ du transport aérien intérieur a été de 62 % de 1990 à 2012 (soit 2,2 % en moyenne par an), contre une augmentation des passagers-km de 159% sur la même période (soit 4,4 % en moyenne par an)⁵⁸.

Comme on le voit sur le graphique ci-dessous, les deux faisceaux qui croissent le plus sont les vols internationaux : métropole-Europe avec 4,1 % de croissance en passagers en moyenne annuelle de 2000 à 2015, et métropole-international hors Europe avec 3,3 % de croissance en passagers en moyenne annuelle. Le transport aérien intérieur métropolitain est en revanche en croissance plus lente, notamment le trafic radial, probablement sous l'effet de la substitution par le TGV dans une large mesure.

⁵⁸ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-emissions-gazeuses-liees-au.html>

Figure F5-1 La demande de transport aérien 2015

Niveau en milliers de passagers ; évolution en %

	Niveau 2015	évolutions annuelles			
		2013	2014	2015	2015/ 2010
Total Métropole	145 470	2,6	3,0	3,6	3,8
Métropole - International	117 620	2,7	4,2	4,2	4,3
dont Paris - International	75 320	1,8	3,9	3,8	3,2
dont Province - International	42 300	4,2	5,0	5,0	6,4
Métropole - Métropole	24 020	2,1	-2,3	1,0	2,0
dont Paris - Province	16 260	0,1	-2,1	0,8	0,9
dont Province - Province	7 760	6,6	-2,7	1,3	4,6
Métropole - Outre-mer	3 830	4,1	-0,5	0,3	1,8
Outre-mer - Intérieur	2 180	0,0	0,5	2,3	0,0
Outre-mer - International	2 300	-2,3	4,8	4,5	1,8
Total Outre-mer	8 300	1,4	1,0	2,0	1,3
Total France (1)	149 940	2,5	3,0	3,5	3,7

(1) Le total France ne correspond pas à la somme des totaux « Métropole » et « Outre-mer » car le trafic « Métropole – Outre-mer » doit être compté une seule fois dans le total du trafic français.

Source : DGAC, avril 2016

Source : CCTN 2015

D'ailleurs, comme il n'existe plus beaucoup de corridors objets d'un trafic significatif pouvant raisonnablement être dotés d'une ligne à grande vitesse (cf. rapport « mobilité 21 »), on peut s'attendre à une certaine reprise de la croissance du trafic aérien radial métropolitain.

Si rien n'était fait au-delà du scénario tendanciel qui inclut pourtant une efficacité énergétique qui s'améliore de l'ordre de 1,5 % par an, la part des émissions de GES du transport aérien dans celles des transports, de l'ordre de 36 % en 2015 pourrait passer à 63 % en 2050 -avec une hypothèse pour les transports terrestres de division unitaire par 2, et en tenant compte d'une croissance tendancielle des flux terrestres à 1 % par an.

Les gains en GES susceptibles d'être effectués par les transports terrestres seraient ainsi plus qu'annulés par l'effet de la croissance du GES du transport aérien ; au lieu d'une baisse de 30 % des GES dans le transport terrestre, la croissance des GES dans l'aérien de 114 % amènerait à une croissance des GES dans les transports de près de 30 %.

			renormalisé
	2015	2050	2050
transport aérien	87	186	67%
autres transports	131	93	33%
total transports	218	279	100%

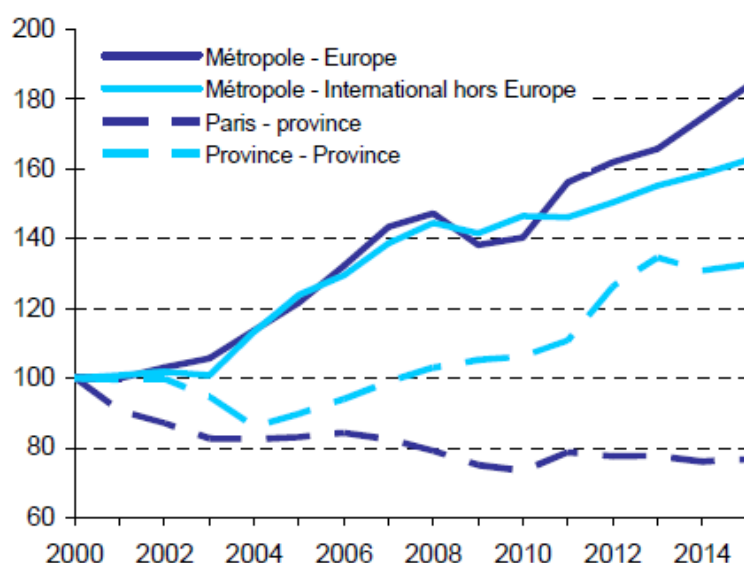
	Variation	Variation %
transport aérien	99	114%
autres transports	-38	-29%
total transports	61	28%

Source : exemple de calculs de la mission

C'est dire l'importance de la maîtrise des émissions de GES dans l'aérien.

Figure F5-3 Évolution du nombre de passagers transportés par faisceau

Niveau de passagers (Indice 100 en 2000)



Source : DGAC, avril 2016

Source : CCTN 2015

Si l'on peut comprendre que la dynamique des échanges entre la France et le monde hors pays développés ressortit dans une large mesure aussi du développement des pays en voie de développement, et peut relever d'un objectif un peu moins ambitieux que le facteur 4, on voit moins de prime abord pourquoi le transport aérien entre la France et l'Europe d'une part et entre la France et les autres pays développés (principalement Amérique du Nord, Australie, Nouvelle-Zélande, Japon, Corée) ne devrait pas être intégré dans l'assiette de la division par 4 des émissions de GES.

2.3.26.3. La solution de l'électrification est peu applicable

A la différence des transports terrestres, le transport aérien doit fournir l'énergie apte à soulever sa masse. De ce fait, une batterie ne disposant que d'environ 100 fois moins d'énergie par kg que le kérosène, il est difficile de voir un avenir possible économiquement viable pour des avions pleinement électriques. Il existe toutefois des projets d'avions hybrides, ou électriques sur des vols courts comme une demi-heure. Le démonstrateur e-fan de Airbus a vocation à tester la faisabilité de ce concept. Au-delà du sujet des GES, l'usage d'un moteur électrique aux phases d'atterrissage et de

décollage pourrait réduire le bruit des phases sensibles pour les populations riveraines. Par contre, la faible énergie par kg de la batterie reste un obstacle redoutable.

2.3.26.4. Des sources additionnelles d'expérimentation ou de progrès possible : turbo-propulseur, allègement, hydrogène, gaz naturel, dirigeables, nucléaire, carburants alternatifs...

Il existe toutefois des perspectives de freiner cette progression, à volume de trafic donné, au-delà des améliorations tendanciennes des motorisations qui doivent être poursuivies.

L'usage de motorisation « turbo-prop » pour l'aviation régionale permettrait de réduire significativement les CO₂, au prix d'une légère baisse de vitesse, mais sans importance significative pour des vols courts qui de toute façon durent environ 1 heure seulement, avec un peu de bruit en plus toutefois. La zone de pertinence actuelle du turbo-prop serait jusqu'à 650 km (350 milles nautiques) environ hors prise en compte des questions de GES. Probablement, si on prenait en compte ces questions, le turbo-prop serait pertinent au-delà, peut-être jusqu'à 1000 km. De plus en volant plus bas, ils restent dans la tropopause, et l'effet sur l'ozone et sur les traînées de condensation est réduit. Cette solution n'est cependant pas appropriée aux vols long courrier⁵⁹.

On notera d'ailleurs à cet égard que les avions à réaction (jet) d'aujourd'hui n'émettent en fait pas moins de CO₂ par passager-km que les certains avions à hélices (moteur à pistons) des années 1950⁶⁰.

L'allègement des avions peut être une autre piste, notamment avec les polymères à fibres de carbone renforcée, qui pourraient faire gagner 15 % d'émissions de CO₂ d'ici 2050.

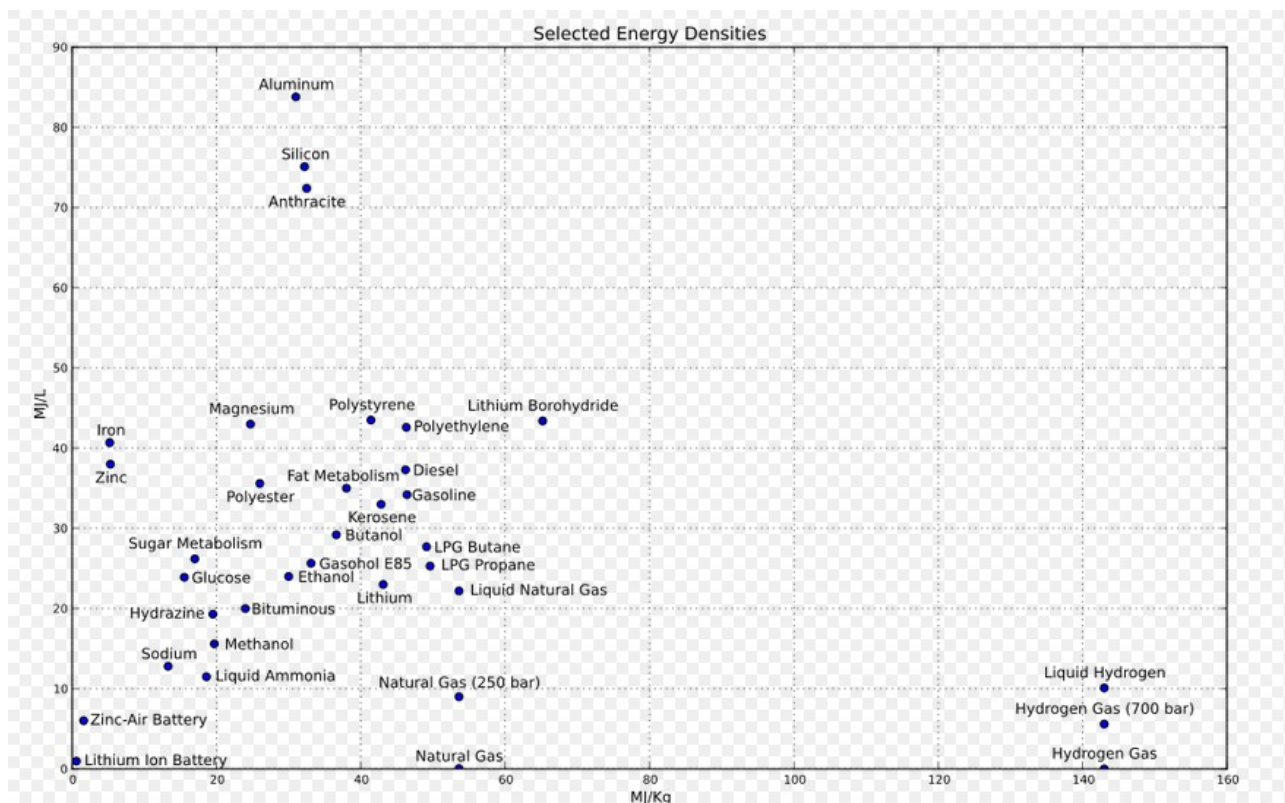
La réduction des émissions lors des circulations au sol constitue une autre piste, avec une motorisation électrique pour le tracteur de l'avion. Cela impose une gestion logistique performante de ces tracteurs.

Un système de catapulte électromagnétique (avec moteur linéaire) au décollage, phase la plus gourmande en énergie, pourrait également réduire les émissions de GES. Elle est utilisée d'ores et déjà dans des contextes contraints comme sur les porte-avions, mais imposerait des surcoûts dans un contexte normal d'aéroport.

À long terme la solution de l'hydrogène est à considérer, qui présente une énergie par kilogramme supérieure à celle du kérosène, mais une énergie volumique inférieure. A même autonomie, l'avion serait plus léger (ce qui fait moins de charge à soulever) mais nettement plus volumineux, donc avec plus de résistance à l'avancement et une plus forte prise au vent.

⁵⁹ Turbo aversion, turbo reversion, the Economist, février 2012
<http://www.economist.com/blogs/gulliver/2012/02/air-travel-and-turboprop-revival>

⁶⁰ Fuel efficiency of commercial aircraft, NLR national aerospace laboratory Pays-bas, Peeters and al, 2005
https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2005-12_nlr_aviation_fuel_efficiency.pdf



Source : Energy density of fuels, by mass (horizontal) and by volume (vertical)

https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen-powered_aircraft#/media/File:Energy_density.svg

Un prototype de drone de Boeing « Phantom eye » fonctionnant à l'hydrogène a été construit aux Etats-unis pour des besoins militaires et semble donner globalement satisfaction sur le plan technique. Si la quantité d'énergie par kg de l'hydrogène est supérieure au kérosène, il n'en va pas de même avec la quantité d'énergie par litre, nettement inférieure. Une des solutions possible est l'utilisation d'hydrogène liquide qui présente une meilleure densité volumique, mais qui reste encore trois fois plus faible que celle du kérosène. Airbus a également construit un prototype à l'hydrogène liquide dans le cadre du projet Cryoplane. Cela reste toutefois à ce stade des projets de long terme, avec des enjeux de sécurité importants à résoudre pour une exploitation commerciale viable.

L'usage du gaz naturel comprimé ou du gaz naturel liquéfié a également été envisagé. La densité massique et la densité volumique de ce dernier (GNL) sont assez proches de celles du kérosène, celles du GNC un peu moins sur le plan de la densité volumique. Un prototype avait été mis en service en 1988 en Union Soviétique (Tu-155) avec le moteur à carburant cryogénique pour fonctionner à l'hydrogène liquide ou au gaz naturel liquéfié. Il aurait effectué une centaine de vols (dont 5 à l'hydrogène liquide) et démontré la faisabilité de l'avion et du système d'alimentation en carburant cryogénique sur le plan technique⁶¹. Les enjeux lourds de sécurité à résoudre en font aussi un projet de long terme. Sur le plan de l'effet de serre, l'usage du gaz naturel réduit à même quantité d'énergie un peu les émissions de GES.

⁶¹ « Le 15 avril de cette année marque le 20e anniversaire du premier vol du Tu-155, qui peut fonctionner à l'hydrogène liquide ou de gaz naturel liquéfié », communiqué de presse de Tupolev, 2008 <http://www.aviaru.net/pr/?id=11633>

Parmi les pistes à examiner figurent également les dirigeables hybrides-air. Remplis avec un gaz plus léger que l'air, l'hélium, qui n'est pas inflammable à la différence de l'hydrogène, avec une motorisation, ils pourraient permettre de réduire fortement la consommation de carburants. Issu du programme abandonné depuis LEMV (long endurance multi-intelligence vehicle) de l'armée américaine, le prototype « Airlander 10 » de la société britannique HAV a effectué son premier vol le 17 août 2016, mais a été endommagé lors de l'atterrissage sur le nez lors de son second vol le 24 août 2016. Il peut naviguer à 150 km/h à une altitude proche de 5000 mètres, et peut rester 2 ou 3 semaines en l'air à vide, ou 5 jours si un pilote est à bord, est doté de 4 moteurs de 350 chevaux-vapeur chacun (soit environ 250 kW) et emporter 10 tonnes de charge utile (sur un volume de 3,2m*7,2m*1,7m). Une version ultérieure « Airlander 50 » pourrait emporter 50 tonnes.

Plus ambitieux encore, la société russe Augur-RosAeroSystems propose des systèmes similaires, avec des projets (notamment ATLANT) ayant jusqu'à 170 tonnes de charge utile, jusqu'à une portée 5000 km, et vise un coût de revient global de 7 à 15 roubles soit 10 à 20 centimes d'euros par tonne-km.

Le concept ne semble pas poser de problème de sécurité lié à des combustibles, cependant la prise au vent reste importante, ce qui peut poser des problèmes lors d'événements météorologiques défavorables.

Des utilisations pour du transport de marchandises, de la publicité, de la surveillance, des télécommunications, voire du transport de passagers sont envisagées.

L'évaluation de la crédibilité économique de ce type d'innovation n'est pas aisée. Pour usage fixe (surveillance, télécommunications), la consommation d'énergie est très faible, et l'autonomie très longue, ce qui doit en faire une alternative intéressante à l'hélicoptère.

En transport de marchandises, on peut compter par la route environ 1 euro pour un PL-km, soit 7 centimes d'euro par tonne-km s'il est chargé à 15 tonnes par exemple. Le coût de revient cité par RosAeroSystems (10 à 20 centimes) reste au-dessus, mais permet d'envisager toutefois des solutions crédibles économiquement là où la couverture par les infrastructures terrestres est mauvaise (par exemple en montagne) ou en franchissement d'obstacles tel un détroit maritime, surtout si le pilotage peut être automatisé.

En transport de passagers, la viabilité économique semble plus incertaine. La faible vitesse amène à ce que les coûts du personnel par km parcouru soient probablement importants par km.



Premier décollage pour Airlander 10, le plus grand aéronef du monde, août 2016, <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/aeronautique-premier-decollage-airlander-10-plus-grand-aeronef-monde-63976/>



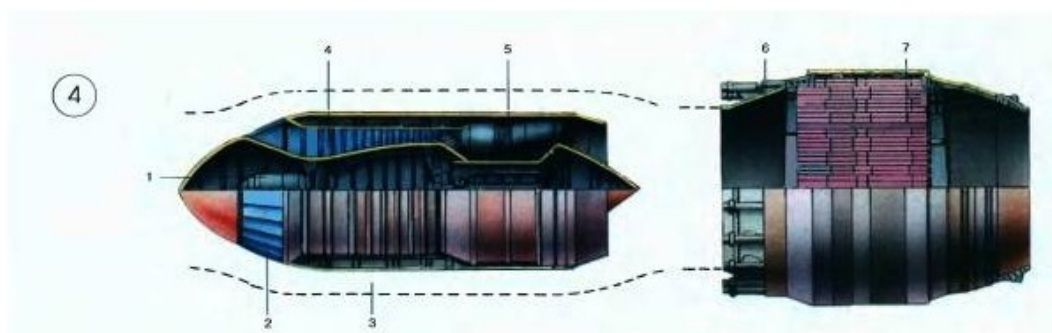
The aerostatic transport aircraft of a new type, Augur RosAeroSystems
<http://rosaerosystems.com/atlant/obj858>

On notera pour être le plus complet possible également qu'ont été développés aux Etats-Unis et en Union soviétique des avions à propulsion nucléaire. Le prototype plus abouti a été le AN 22 01 07 soviétique qui effectua des vols d'essais en vue de sa qualification. Le réacteur était isolé par une couche de plomb pour éviter l'irradiation de l'équipage, à circuit à haute température, et conçu en circuit fermé, pour éviter, contrairement aux prototypes précédents, des émissions de matières radioactives en cours de vol. De plus, il était prévu en cas d'incident majeur de pouvoir détacher le réacteur et de le larguer par parachute, et ce afin de minimiser les risques de catastrophe atomique à l'impact au sol en cas d'incident.

Les risques posés en cas d'écrasement de l'avion ne rendent pas cette solution envisageable.



This is a drawing of this engine. It was called "combined turbo jet nuclear engine."



Soviet top secret nuclear airplane M60 <http://www.akademiportal.com/soviet-top-secret-nuclear-airplane-m-60/>; AN 22 Ante cock variants, global security <http://www.globalsecurity.org/military/world/russia/an-22-variants.htm>

En pratique, au-delà des progrès tendanciels dans la motorisation et en allègement des structures, c'est le recours aux bio-carburants qui pourrait également accélérer la réduction des émissions de GES. La quantité d'énergie par kg ou par litre est assez proche de celle du kérosène. L'introduction peut également être progressive. Les algues, le Jatropha ou la Camelina présentent des propriétés qui les rendent adaptées à un usage dans le transport aérien. Une estimation des surfaces de culture nécessaires pour la substitution au kérosène actuellement consommé ressort à 68 milliers de km² sur la base d'algues, contre 2000 à 2700 milliers de km² pour les autres plantes. Dans le premier cas, on évoque une surface limitée comme celle de l'Irlande, dans l'autre nettement plus importante comme un quart à un tiers de l'Australie, ou deux à trois fois plus que la surface mondiale allouée au maïs.

Si les volumes de bio-carburants sans entrer en compétition avec la filière alimentaire sont limités par des considérations de surface disponible, ce qui serait consommé dans le transport aérien ne le serait pas dans le transport routier. Ce n'est donc que si la filière algues (3ème génération), nettement moins consommatrice de surface, devient économiquement viable qu'on peut envisager une solution de ce type.

Hankammer et al⁶² dans sa revue de littérature cite un coût de revient de biocarburants provenant d'algues de l'ordre de 84 \$/baril, mais avec de très nombreuses incertitudes.

Solazyme⁶³ a annoncé en 2015 produire du bio-carburant à base d'algues, adapté au transport aérien, à un coût, qui dans un processus industrialisé serait de 0,91 \$ par litre, donc environ 150 \$ par baril. Si on compare avec un prix du baril proche de 50\$, la différence ressort à 100 \$ par baril soit environ 200 E/tCO₂.

En 2013, le PDG de Exxon⁶⁴ situe la viabilité économique des biocarburants à bas d'algues dans 25 ans seulement, donc vers 2038. Il ne semble toutefois pas avoir défini précisément la notion de viabilité économique. On peut supposer néanmoins qu'avec le progrès technique et les rendements d'échelle le coût de production des biocarburants devrait baisser.

Si on part sur le chiffre de 84 \$/baril dans une dizaine d'années, le surcoût serait de 34 \$/baril (soit en gros 70 E/tCO₂) par rapport à un baril à 50\$. Sur un vol aller simple Paris New-York la hausse de prix serait de l'ordre d'un peu moins de 40 euros, à 3,3 litres/100 km voire un peu moins si l'efficacité du moteur augmente un peu. Le prix serait ainsi renchéri d'environ 10 %, ce qui ne paraît pas très considérable du point de vue de l'utilisateur. Bien entendu, il est important que l'ensemble des compagnies sur un même trajet soient traitées équitablement.

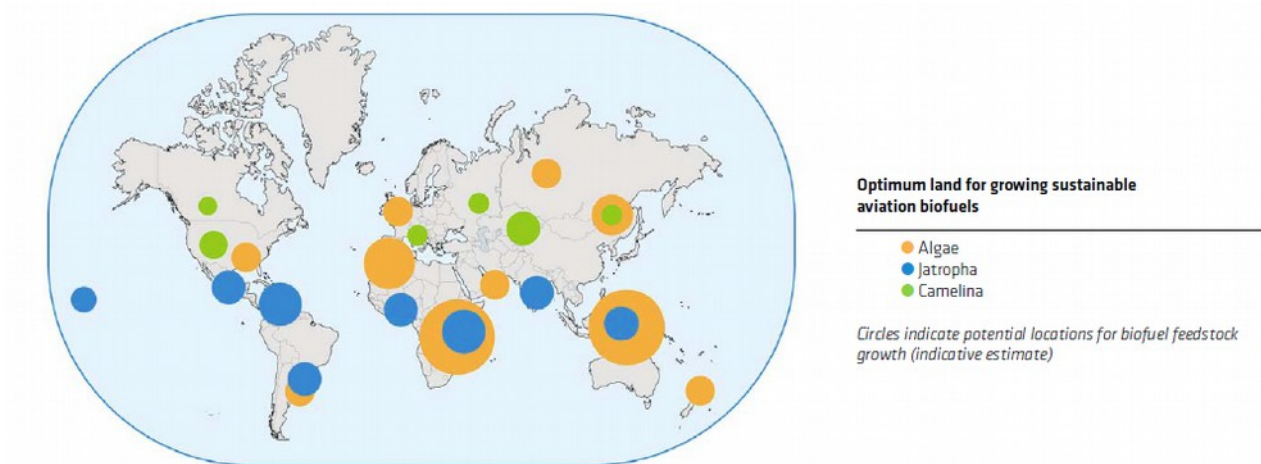
Reste le sujet du lien entre altitude de la production du CO₂ et pouvoir réchauffant global. Autant au niveau du sol, on peut en première approche considérer que le bio-carburant présente, s'il n'y pas d'entrée de carbone sous forme notamment d'engrais, un bilan GES à peu près neutre en première approche, autant ce n'est pas évident à haute altitude. Si on compte un pouvoir réchauffant global (PRG) de X pour le CO₂ émis en haute altitude, l'usage de biocarburants ne ferait que passer ce PRG qà X-1,. Si ce coefficient X vaut 2, le PRG serait donc divisé par 2 et si X vaut 4, le PRG serait réduit d'un quart seulement. Ce qui ne veut pas dire qu'il ne faut pas le faire, mais que l'effet sur le changement climatique peut subsister, même dans une hypothèse très ambitieuse de taux d'incorporation de 100 % de bio-carburants.

Globalement, la situation du transport aérien vis-à-vis des émissions de GES reste donc préoccupante.

⁶² An economic and technical evaluation of microalgae biofuels, supplementary data, Hankammer et al, in Nature, vol 28 no2 <http://www.nature.com/nbt/journal/v28/n2/extref/nbt0210-126-S1.pdf>

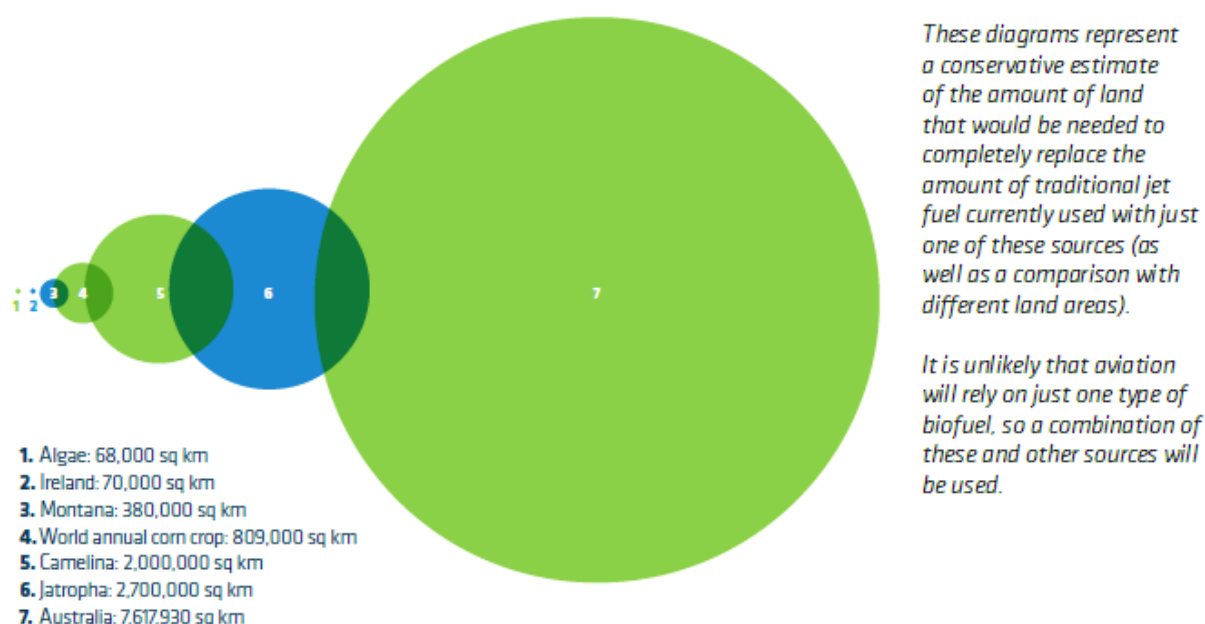
⁶³ Solazyme, biofuels digest 2015 5 minute digest, février 2015 <http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/02/08/solazyme-biofuels-digests-2014-5-minute-guide-2/>

⁶⁴ Exxon at least 25 years away from making fuel from algae, Bloomberg, mars 2013 <http://www.bloomberg.com/news/articles/2013-03-08/exxon-at-least-25-years-away-from-making-fuel-from-algae>



Source : *Biofuels guide for aviation*

Land area equivalents required to produce enough fuel to completely supply the aviation industry



Source : *Biofuels guide for aviation*

2.4. Résumé des sujets liés aux motorisations et aux sources d'énergie

Si on effectue un bilan des perspectives liées aux évolutions des motorisations et des sources d'énergie, on peut en dégager les éléments suivants, au-delà de la recommandation générale tous secteurs destinée à fixer un cadrage économique global à la réalisation du facteur 4, mais qui est nécessaire et non suffisante, notamment du fait d'asymétries d'informations, de phénomènes de dépendance de chemin, ainsi que de relations entre acteurs.

2.4.1. Utilité et nécessité d'un prix du carbone

Tout d'abord, il semble opportun de mettre en place une taxe GES (ou des systèmes de quotas équivalents pour certains secteurs) calculée de manière à faciliter l'atteinte du facteur 4 à l'horizon 2050. Cette taxe doit être proportionnelle au pouvoir réchauffant global (PRG) du gaz à effet de serre émis, et des circonstances de son émission si celles-ci influent sur le PRG (cas des émissions en haute altitude du transport aérien).

Pour les véhicules légers, la baisse des prix des batteries améliorera la viabilité économique et la diffusion des véhicules hybrides rechargeables et les véhicules électriques, pour les circulations du quotidien en tout cas. Malgré les émissions de GES liées à la production du véhicule et des batteries, et à leur démantèlement, ce type de véhicule peut réduire les émissions de GES d'un facteur proche de 2 pour les circulations du quotidien. De plus l'électrification des transports (en concomitance avec la décarbonation de l'électricité) est l'un des supports de divers scénarios visant à atteindre le facteur 4.

2.4.2. Attrition du moteur thermique

On aurait pu aussi envisager un taux très important d'incorporations de bio-carburants pour réduire les émissions de GES. Toutefois, la surface de la planète n'est pas extensible, et les premières filières ne peuvent plus être significativement développées sans entrer significativement avec la chaîne de production alimentaire. De plus les doutes subsistent sur le bilan net des biocarburants en termes d'émission, si on prend en compte non seulement les intrants en matière et en énergie, mais aussi les effets induits des changements d'affectation des terres. Seule la troisième génération à base d'algues permet une faible consommation d'espace au sol par rapport aux carburants de seconde génération, susceptible d'être compatible avec un développement à grande échelle, mais les dispositifs technologiques et les coûts économiques ne sont pas encore bien connus. À ce stade, le panneau photo-voltaïque ou l'éolien permettent une bien meilleure production d'énergie par unité de surface que la photosynthèse. Leurs coûts sont en forte baisse et deviendront dans quelques années comparables avec ceux des productions thermiques ou nucléaires après acheminement (« grid parity »), voire le sont déjà au vu des réponses à des appels d'offre récents. Dans le cas français, malgré les importations carbonées en pointe de demande, la part importante du nucléaire (associé à l'hydraulique) amènent déjà à pouvoir considérer l'énergie électrique à usage des véhicules électriques comme largement décarbonée. Mais à moyen-long terme, le véhicule électrique ne signifie pas nécessairement véhicule « nucléaire » au vu du caractère de plus en plus économiquement abordable des principales énergies nouvelles renouvelables.

On pourrait ainsi envisager d'interdire à la commercialisation neuve les véhicules légers (VP et VUL) et des autres véhicules urbains (autobus, véhicule de livraison urbaine) à combustion interne (essence et diesel, hybrides non rechargeables) par exemple à l'horizon 2025-2030 et d'interdire ces véhicules à la circulation vers 2035/40-2050. Ce type de mesure, motivée tant par des considérations de pollution de l'air que d'émissions de gaz à effet de serre, ne peut sans doute pas se prendre de manière unilatérale, et une concertation européenne voire mondiale peut s'avérer nécessaire au titre du droit à la concurrence.

La perspective de cette interdiction devrait permettre de focaliser l'attention des acteurs et du public sur l'accompagnement d'un basculement à grande échelle vers le véhicule électrique ou rechargeable. Elle devient crédible du fait de la baisse des coûts

des batteries, et commence à figurer ou à être débattue dans les plans de plusieurs pays européens (Norvège, Autriche, Pays-Bas,...). La possibilité de commercialiser des véhicules hybrides rechargeables permet aux utilisateurs de disposer d'une solution sans stress de la panne d'électricité et utilisable sans difficultés pour des usages interurbains, au moins pendant une phase de transition d'une dizaine ou une quinzaine d'années.

2.4.3. Le droit à la prise électrique

L'accès à la prise est une condition nécessaire de l'emploi de masse du véhicule léger électrique ou hybride rechargeable. Sans mesures fortes, il est susceptible de poser problème dans les autres cas que les propriétaires en maison individuelle : locataires, propriétaires en collectif, entreprises. Il est important que chacun puisse disposer d'une prise chez lui et à son travail ou lieu d'études, ainsi que des prises dans l'espace public. Plus le nombre de ces prises sera important, plus il y aura des chances que la charge puisse être effectuée à des périodes où l'électricité est décarbonée. Certes, il y a aujourd'hui un droit à la prise pour un copropriétaire, mais à ses frais ou bien pour un locataire, mais à ses frais également, mais ceci n'est pas suffisant en pratique pour une diffusion en masse.

Compte tenu d'une durée de vie utile des VL de l'ordre de 10 à 15 ans, on aboutirait à un parc VL entièrement rechargeable pour les usages du quotidien vers 2040.

Il peut ainsi être opportun de passer d'un système de « droit à la prise » à un système de « devoir de prise » impliquant des obligations de mise aux normes d'ici 2025 dans les stationnements des copropriétés, des entreprises, lieux de travail et d'étude, des commerces et des parcs de stationnement publics.

Concrètement, la prise électrique sur le lieu de stationnement doit devenir une norme, à domicile comme au bureau, avec des mises aux normes effectuées d'ici 2025, et pas seulement en cas de grands travaux dans le parking. Aujourd'hui, le système du « droit à la prise » donne la priorité à la protection des avoirs des copropriétaires qui continuent d'utiliser un véhicule thermique, qui sont protégés des coûts impliqués par le branchement de prises de ceux qui veulent s'équiper d'un véhicule rechargeable. Ces derniers se retrouvent pénalisés par des démarches pouvant être longues (en tout cas au-delà de la durée d'achat d'un véhicule), et avec de plus des surcoûts si chaque prise est installée au cas par cas. En contrepartie, des réductions fiscales significatives mais décroissantes dans le temps pourraient être concédées pour favoriser ces mises aux normes rapidement.

2.4.4. Une gestion intelligente de la charge sur le réseau dûe à la charge des véhicules électriques

Le taux de carbone dans le mix électrique peut varier encore très largement d'une heure à l'autre, d'un jour à l'autre en fonction des aléas d'une offre de plus en plus renouvelable par nature intermittente et des aléas de la demande. Il est important que la charge des véhicules électriques ou hybrides rechargeables s'effectue à des heures « décarbonées ». De plus, la batterie des véhicules pourrait aussi permettre de lisser les pointes d'offre ou de demande dans une certaine mesure, pour dé-carboner l'électricité pour d'autres usages que les transports.

Il peut donc être opportun de mettre en place un système de « smart grid », permettant aux batteries de véhicules électriques de charger aux heures les plus « décarbonées »

et autant que possible décharger aux heures « carbonées » pour bénéficier à d'autres usages.

Ces « smart grids » ne nécessitent pas d'être extrêmement intelligents. Une simple information sur le taux de carbone dans le mix électrique (y compris les importations le cas échéant) suffit.

2.4.5. Une nécessaire analyse du cycle de vie

Dans le véhicule électrique, avec une électricité largement décarbonée, la part des émissions de GES se situe non pas à l'usage mais à la phase de construction et celle du démantèlement. C'est donc sur ces phases qu'il convient d'agir si on veut aller encore plus loin dans la décarbonation des transports de la vie quotidienne.

Il pourrait donc être opportun de labelliser les batteries en fonction de leur contenu en carbone dans la production et le démantèlement, mettre en place des filières de recyclage, et les recycler en fin d'usage transports pour d'autres usages pouvant se contenter des performances d'une batterie au-delà de la mi-vie.

La question du devenir des batteries en fin de vie reste posée.

2.4.6. Vers une électrification interurbaine ciblée

Reste ensuite au sein des transports terrestres le cas des véhicules à usage majoritairement interurbain, notamment les poids-lourds. Pour ces véhicules, la motorisation électrique ne peut être l'unique solution, même si dans certain cas l'hybride rechargeable peut déjà réduire les émissions de GES pour les trajets peu longs.

Une voie peut être celle de la recharge pendant que le véhicule roule, grâce à une électrification des grands axes autoroutiers. Cette électrification est d'ores et déjà testée pour les poids lourds. Elle pourrait sûrement bénéficier aussi aux véhicules légers. Un réseau de 3000 km au moins couvrirait déjà les plus grands axes (Calais-Marseille, Paris-Hendaye, Bordeaux-Nice,...). La durée de vie utile des PL interurbains étant de l'ordre de 6 ans, la diffusion dans le parc d'une norme de captage de courant par pantographe pourra être assez rapide, si elle est prise vers 2025. On pourrait donc électrifier (installer des caténaires pour pantographe) d'ici 2030 le cœur de réseau autoroutier interurbain le plus dense, soit au moins 3000 km, et imposer la mise aux normes de captation par pantographe aux poids-lourds interurbains neufs dès 2025 et expérimenter l'accès des véhicules légers à ces installations.

Éventuellement, si le trafic le justifie, cette électrification pourrait être étendue aux grands axes navigables.

2.4.7. Des infrastructures de recharge électrique rapide

Pour les véhicules routiers (VL et PL), il y a également deux solutions pour l'électrification en usage interurbain : les bornes de recharge rapide et les systèmes d'échange rapides de batteries. Ces deux solutions ne sont pas sans poser des problèmes : les recharges rapides durent actuellement environ 1 heure ce qui dépasse la durée de pause ordinaire (mais peut-être pas celle d'une pause déjeuner). L'échange rapide de batterie, outre les problèmes techniques, pose aussi un problème

économique pour le détenteur d'une batterie qui disposerait encore de nombreux cycles de vie devant elle qui serait remplacée par une batterie en fin de vie. Cependant, cet obstacle ne semble pas infranchissable si un système de points en fonction de l'état de la batterie était mis en place, mais cela amènerait à faire fonctionner un système collectif de batteries. On en arrive ainsi à la possibilité de développer un réseau universel de recharge électrique rapide sur les grands axes interurbains et d'expérimenter des systèmes d'échange standard rapides de batteries.

2.4.8. Œuvrer à la décarbonation des deux-roues

Pour les motos et scooters, ainsi que les vélos à assistance électrique, le passage à l'électrique commence d'ores et déjà à se justifier pour un utilisateur rationnel sur le cycle de vie. Cependant, le basculement vers l'électrique serait favorisé par un élargissement aux deux-roues du système de bonus malus à l'achat. Le développement d'offres en libre service permettrait aussi de vaincre les préjugés liés au caractère récent de ces motorisations.

Il peut être opportun d'élargir aux deux-roues (motos, scooters, vélos à assistance électrique) les systèmes de bonus malus des automobiles et camionnettes et d'encourager les systèmes de moto-partage urbain en boucle et en trace directe.

2.4.9. Les biocarburants de seconde ou troisième génération

Il n'en reste pas moins que pour les usages interurbains, l'usage de carburants « traditionnels » restera important pendant encore plusieurs décennies. On ne voit alors, outre l'allègement des véhicules, comme solution viable que l'incorporation croissante de bio-carburants. L'électrification des déplacements de la vie quotidienne réduira l'assiette de carburants fossiles à prendre en compte, donnant la possibilité, à même quantité de bio-carburants, d'augmenter le taux d'incorporation. La seconde génération réduit les conflits avec la filière alimentaire mais n'est peut-être pas suffisante pour une décarbonation à grande échelle en raison des surfaces nécessaires, sans préjudice des impacts sur l'occupation des terres. Progressivement, avec le développement de la troisième génération de bio-carburants, la quantité incorporée pourra également augmenter, sans entrer en compétition avec la filière agro-alimentaire et sans préjudice d'éventuels impacts sur l'occupation des terres. Ces bio-carburants ne sont pas exclusivement sous forme liquide, une partie pourrait être constituée par du bio-gaz provenant de la valorisation des déchets.

En revanche, le recours au gaz naturel (et du biogaz provenant de sources agricoles) comme carburant de transition, envisageable techniquement d'un point de vue transport, suppose que l'on fasse la lumière sur le taux de fuites à la production et à la distribution qui peuvent fortement impacter le bilan GES du fait d'un PRG (pouvoir réchauffant global) du méthane supérieur à 30. Il suffit de 3 % de fuites pour doubler le PRG du méthane brûlé. Il peut donc être opportun d'incorporer de plus en plus de bio-carburants (et bio-gaz de source déchets) dans le transport interurbain de voyageurs et de marchandises, en augmentant le taux au fur et à mesure que la filière de troisième génération devient viable. Favoriser les recherches en vue de la viabilité de cette filière peu consommatrice de surface au sol.

2.4.10. Inclure le mode maritime dans les échanges de droits d'émissions

Le mode maritime est en forte croissance, notamment à l'international. La participation à un système d'échange de droits d'émissions est donc nécessaire pour réduire ses émissions de GES. Ce système pourrait viser, comme pour les transports terrestres un objectif de division par 2 des émissions de GES à l'horizon 2050. Cet objectif pourra être largement atteint par une incorporation de bio-carburants (comme le transport terrestre interurbain) et de surcroît le recours à l'énergie du vent, qui semble économique très avantageuse (rentabilisation de 2 ans) sans forcément brider la croissance des tonnes-km transportées.

Il conviendrait donc d'inclure à terme le mode maritime, en commençant par l'intracommunautaire, dans un système d'échange de droits d'émissions de GES.

2.4.11. Clarifier les contributions du mode aérien et les inclure dans les échanges de droits d'émissions

Reste le sujet du mode aérien. Isolément, des simulations simples montrent que son développement actuel, même combiné avec les progrès tendanciels en matière d'émissions unitaires, pourrait annuler l'ensemble des efforts accomplis par la motorisation et technologies associées pour les modes terrestres. Cela dépend aussi des estimations du pouvoir réchauffant global des émissions de GES (CO₂ notamment) du mode aérien qui ne semblent pas encore claires à ce jour. Sans attendre une clarté totale, il conviendrait de tenir compte au moins du milieu de fourchette des coefficients d'équivalence dès maintenant.

Le transport aérien communautaire va prochainement entrer dans un système d'échange de droits d'émissions. Il s'agit d'un premier pas utile pour contribuer à la maîtrise des émissions de GES de ce secteur. Mais ce système doit à terme inclure aussi le transport aérien international, secteur qui connaît les taux de croissance parmi les plus élevés.

L'OACI a engagé une politique d'ensemble de régulation des émissions de CO₂ du secteur de l'aviation civile internationale. Cette politique particulière de l'organisation repose essentiellement sur la [Résolution A38-18 de l'Assemblée générale](#) (« Exposé récapitulatif de la politique permanente et des pratiques de l'OACI dans le domaine de la protection de l'environnement — Changements climatiques ») adoptée lors de la 38e session de l'Assemblée de l'OACI (septembre 2013)⁶⁵. Celle-ci fixe à l'Organisation un programme de travail sur l'aviation internationale et les changements climatiques pour le triennal 2014-2016 dans le sens d'un « objectif ambitieux collectif consistant à maintenir les émissions nettes mondiales de carbone provenant de l'aviation internationale au même niveau à partir de 2020 » (objectif de « Croissance Neutre en Carbone » ou « CNG 2020 »).

Pour atteindre l'objectif CNG2020, alors même que le trafic aérien international connaît une croissance moyenne de l'ordre de 5% par an, l'OACI a développé le concept « de panier de mesures » qui permet de décliner quatre axes d'action :

1. l'amélioration de la performance environnementale des aéronefs,
2. des procédures opérationnelles (gestion de la circulation aérienne) conduisant à réduire la consommation de carburant,
3. le développement des biocarburants durables pour les aéronefs,

⁶⁵ http://www.icao.int/Meetings/a38/Documents/Resolutions/a38_res_prov_en.pdf

4. la mise en place de mesures économiques fondées sur le marché (GMBM *Global Market Based Measures*).

Le projet de GMBM actuellement en cours de discussion au sein de l'OACI correspond à ce 4^{ème} axe d'action. Il vise à la mise en place d'un mécanisme de marché mondial où, par un système d'obligation d'achat de crédits de compensation des émissions de CO₂ supérieures niveau des émissions de l'année 2020, les opérateurs aériens pourront participer à l'objectif de croissance neutre en carbone du secteur. Ce GMBM est complémentaire dans la mesure où il a vocation à permettre de couvrir le niveau d'émission qui n'aurait pu être atteint grâce aux trois autres éléments du panier de mesures.

L'ensemble des documents en cours de négociation est disponible sur le site internet de l'OACI. La réunion de haut niveau sur le GMBM de mai 2016 a constitué une opportunité pour un indéniable progrès dans ces discussions en permettant de préciser de manière consensuelle plusieurs dispositions du texte. Les débats, par leur caractère très constructif, ont permis par ailleurs de commencer à dégager des pistes de solution possibles sur plusieurs éléments clefs du texte, le principal point de discussion étant celui de la différenciation des obligations de compensation, à concilier avec la non-discrimination et la non-distorsion concurrentielle. Pour le trafic national, un rapport commandité par « action climat » pointe une TVA réduite à 10 % sur les billets d'avion et l'absence de taxation du kérosène⁶⁶. On notera que la TVA à taux réduit est applicable à pratiquement tous les transports de voyageurs, mais que cette TVA n'est pas récupérable⁶⁷.

De par sa nature technologique, il est à craindre que le transport aérien soit un des secteurs les plus difficiles à décarboner. La réduction des consommations unitaires au moyen d'autres motorisations que les jets (usage de « turbo-prop ») sont une piste pour les vols de courte et moyenne distance. L'incorporation de hautes doses de bio-carburants en est une autre, modulo les problèmes liés à la production de GES à haute altitude et leur PRG élevé limitant l'impact. Mais il ne serait pas étonnant que le prix du carbone nécessaire pour atteindre le facteur 4 en France et dans les pays développés (et un effort raisonnable équivalent ailleurs) soit largement fixé par le mode aérien. Des impacts sur la substitution modale lorsqu'elle est possible et une modération substantielle de la croissance de la demande, voire de la demande elle-même, sinon ne sont pas à exclure.

Il conviendrait donc de clarifier le pouvoir réchauffant global (PRG) des émissions de GES du mode aérien du fait de l'altitude des émissions et des traînées de condensation et en tenir compte ; étendre un système d'échange de droits d'émissions à l'ensemble du transport aérien international, paramétré de manière à être compatible globalement (tous secteurs économiques confondus) avec le facteur 4.

Une première avancée a eu lieu en octobre 2016 au niveau de l'OACI à Montréal. Schématiquement, l'accord⁶⁸ dit « CORSIA » (Carbon offsetting and reduction for international aviation) vise une compensation (MBM mécanisme basé sur le marché) des émissions de GES de l'aviation civile internationale au niveau de 2020, pour les émissions des pays signataires, et en dehors des petites compagnies.

⁶⁶ http://www.rac-f.org/IMG/pdf/CE_Delft_7C52_Indirect_subsidies_for_domestic_passenger_air_transport_in---.pdf

⁶⁷ <http://bofip.impots.gouv.fr/bofip/477-PGP.html>

⁶⁸ Accord CORSIA OACI 39^{ème} session point 22 de l'ordre du jour http://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/WP/wp_530_fr.pdf

L'accord comprend une phase pilote de 2021 à 2023, puis une première phase optionnelle de 2024 à 2026, pour les pays qui veulent y participer. Puis de 2027 à 2035 une seconde phase, obligatoire pour les pays représentant plus de 0,5 % de l'activité du transport aérien (en tonnes-km payantes) ou dont la part cumulative dans la liste en ordre décroissant des états représente 90 % des tonnes-km payantes, sauf les pays les moins développés (PLM), les petits états insulaires en développement (PEID), et les pays en développement sans littoral (PDSL). Les « nouveaux venus » (moins de 0,1 % des émissions de 2020) ainsi que les « exploitants à faible niveau d'activité » (moins de 10 000 tCO₂), les petits aéronefs de moins de 5700 kg maximum au décollage sont également exonérés.

Les mesures de compensation prévues concernent les vols d'un pays CORSIA vers un autre pays CORSIA seulement. Ces mesures sont 100 % « sectorielles » (en première approche par pays) jusqu'en 2029, puis individualisées par compagnie, le taux « individuel » passant à au moins 20 % de 2020 à 2032, puis à au moins 70 % de 2033 à 2035.

Au 12 octobre 2016, 66 états, représentant 86,5 % de l'activité de l'aviation internationale, veulent participer dès le début à la phase pilote (2021). Ils incluent notamment l'Union Européenne, la Suisse, la Norvège, les États-Unis, le Canada, le Mexique, l'Australie, la Nouvelle-Zélande, le Japon, la Chine et la Corée du Sud.

Toutefois, il ne s'agit pas d'une réduction des émissions de GES du transport aérien, mais du financement, sur la base des prix des systèmes d'échange, d'actions de limitation des émissions de carbone le plus souvent dans d'autres secteurs et dans d'autres pays.

Au vu des coûts d'évitement probablement importants des émissions du transport aérien, on peut comprendre qu'il soit globalement plus efficient de réduire les émissions de GES dans d'autres secteurs à coûts d'évitement plus faible.

Ceci dit, une telle approche pose de nombreux risques, notamment celui de la vérification du réel impact et de la réelle additivité des mesures compensatoires financées.

Un autre point à clarifier est celui de la prise en compte de la variation du pouvoir réchauffant global (PRG) en fonction de l'altitude.

2.4.12. Un exemple de simulation : difficultés de réduire les émissions des transports dans un contexte de croissance

Mis bout à bout, que peut-on espérer comme gains d'émissions de GES à l'horizon 2050 ?

Le tableau ci-dessous donne une ventilation des tonnes équivalent pétrole (tep) consommées dans les transports en 2015, assez proche des émissions de GES. Il est cependant tenu compte d'un pouvoir de réchauffement global (PRG) spécifique pour l'aérien de l'ordre de 3 faute d'informations plus précises. Les consommations incluent les livraisons de carburants en France aux soutes maritimes françaises et étrangères (hors lubrifiants) et aux aéronefs français et étrangers (source CCTN rapport 2015 figure D2-1 page 77).

Une hypothèse de croissance économique est effectuée de 1 %, ainsi que pour chaque ligne d'élasticité de la croissance des tep à la croissance économique (élasticité des trafics diminuée de la productivité tendancielle des motorisations).

	Coeff PRG air		3				
				Croissance annuelle	1,00%	1,00%	1,00%
Scénario tendanciel							
Millions de tep/an			Mtep*PRG				
	2015		2015	Elasticité du GES à la croissance	2025	2035	2050
VP	23,7	47%					
dont usage vie quotidienne		33%	16,6	1,0	18,3	20,2	23,5
dont usage interurbain		14%	7,1	1,0	7,9	8,7	10,1
2R motorisés	0,5	1%	0,5	1,0	0,6	0,6	0,7
VUL	7,1	14%	7,1	1,5	8,2	9,6	12,0
PL marchandises	7,8	16%	7,8	1,0	8,6	9,5	11,0
Bus urbains	0,6	1%	0,6	1,0	0,7	0,7	0,8
Cars (interurbains)	0,6	1%	0,6	1,0	0,7	0,7	0,8
Ferroviaire	0,8	2%	0,8	1,0	0,9	1,0	1,1
Aérien	6,9	14%	20,7	3,0	27,8	37,4	58,2
Maritime et fluvial	1,6	3%	1,6	2,0	2,0	2,4	3,2
Fluvial	0,2	0%	0,2	1,0	0,2	0,2	0,2
Divers	0,2	0%	0,2	1,0	0,2	0,3	0,3
Total	50,0	100%	63,8		76,0	91,3	122,1
Croissance p.r. à 2015			0%		19%	43%	91%

Exemple de calcul – source, calculs de la mission

Le scénario tendanciel aboutit, par rapport à 2015, à une croissance des GES de 91% d'ici 2050.

L'ensemble des mesures énoncées ici (hors effets comportementaux) est supposée donner les effets suivants pour ce qui concerne les émissions unitaires, l'aérien d'ici 2050 étant supposé ne pas se modérer en termes de demande, continuer les efforts tendanciels sur les motorisations, et incorporer massivement des biocarburants :

	Taux réduction p.r. tendanciel		
	2025	2035	2050
VP			
<i>dont usage vie quotidienne</i>	5%	40%	60%
<i>dont usage interurbain</i>	1%	15%	50%
2R motorisés	1%	30%	50%
VUL	1%	40%	60%
PL marchandises	1%	20%	50%
Bus urbains	7%	50%	70%
Cars (interurbains)	1%	20%	50%
Ferroviaire	0%	15%	50%
Aérien	1%	5%	20%
Maritime et fluvial	0%	40%	60%
Fluvial	0%	20%	50%
Divers	0%	20%	50%

Exemple de calcul – source, calculs de la mission

Si on croise avec le tableau précédent, on obtient les estimations suivantes :

Scénario motorisation et biocarburants et électrification des grands axes						
Millions de tep/an		Mtep*PRG				
	2015	2015		2025	2035	2050
VP	23,7					
<i>dont usage vie quotidienne</i>		16,6		17,4	12,1	9,4
<i>dont usage interurbain</i>		7,1		7,8	7,4	5,0
2R motorisés	0,5	0,5		0,5	0,4	0,4
VUL	7,1	7,1		8,2	5,7	4,8
PL marchandises	7,8	7,8		8,5	7,6	5,5
Bus urbains	0,6	0,6		0,6	0,4	0,3
Cars (interurbains)	0,6	0,6		0,7	0,6	0,4
Ferroviaire	0,8	0,8		0,9	0,8	0,6
Aérien	6,9	20,7		27,5	35,5	46,6
Maritime et fluvial	1,61	1,6		2,0	1,4	1,3
Fluvial	0,17	0,2		0,2	0,2	0,1
Divers	0,22	0,2		0,2	0,2	0,2
Total	50,0	63,8		74,5	72,4	74,5
Croissance p.r. à 2015		0%		17%	14%	17%
Réduction p.r. tendanciel				-2%	-21%	-39%

Exemple de calcul – Source, calculs de la mission

On arrive à environ 21 % de réduction moyenne par rapport au tendanciel en 2035 et 39 % en 2050. Mais globalement, les émissions de GES en 2050 restent en première approche encore 17 % plus élevées qu'en 2015. La croissance des émissions aériennes notamment ont eu comme effet d'annuler les gains des secteurs terrestres et même au-delà.

Si l'on se rapproche du format SECTEN, qu'on ne tient pas compte du PRG spécifique de l'aérien en fonction de l'altitude, et que l'on ne prend en compte que l'aérien national (soit 3 % des tep transports), on arrive en revanche du fait des motorisations, biocarburants et électrifications, d'ici 2050, à une réduction de 54 % des GES transports par rapport au scénario tendanciel, et de 30 % par rapport à 2015.

Scénario tendanciel :

		Coeff PRG air	1				
Avec air intérieur seulement				Croissance	1,00%	1,00%	1,00%
Scénario tendanciel							
Millions de tep/an		% des tep	Mtep*PRG				
	2015		2015	Elasticité du	2025	2035	2050
VP	23,7	53%					
dont usage vie quotidienne		37%	16,6	1,0	18,3	20,2	23,5
dont usage interurbain		16%	7,1	1,0	7,9	8,7	10,1
2R motorisés	0,5	1%	0,5	1,0	0,6	0,6	0,7
VUL	7,1	16%	7,1	1,5	8,2	9,6	12,0
PL marchandises	7,8	17%	7,8	1,0	8,6	9,5	11,0
Bus urbains	0,6	1%	0,6	1,0	0,7	0,7	0,8
Cars (interurbains)	0,6	1%	0,6	1,0	0,7	0,7	0,8
Ferroviaire	0,8	2%	0,8	1,0	0,9	1,0	1,1
Aérien	1,5	3%	1,5	3,0	2,0	2,7	4,2
Maritime et fluvial	1,6	4%	1,6	2,0	2,0	2,4	3,2
Fluvial	0,2	0%	0,2	1,0	0,2	0,2	0,2
Divers	0,2	0%	0,2	1,0	0,2	0,3	0,3
Total	44,6	100%	44,6		50,2	56,6	68,1
Croissance p.r. à 2015			0%		13%	27%	53%

Exemple de calcul - Source : calculs de la mission

Scénario avec mesures motorisation, biocarburants et électrification des grands axes :

Scénario motorisation et biocarburants et électrification des grands axes							
Millions de tep/an			Mtep*PRG				
	2015		2015		2025	2035	2050
VP	23,7						
dont usage vie quotidienne			16,6		17,4	12,1	9,4
dont usage interurbain			7,1		7,8	7,4	5,0
2R motorisés	0,5		0,5		0,5	0,4	0,4
VUL	7,1		7,1		8,2	5,7	4,8
PL marchandises	7,8		7,8		8,5	7,6	5,5
Bus urbains	0,6		0,6		0,6	0,4	0,3
Cars (interurbains)	0,6		0,6		0,7	0,6	0,4
Ferroviaire	0,8		0,8		0,9	0,8	0,6
Aérien	1,5		1,5		2,0	2,5	3,3
Maritime et fluvial	1,61		1,6		2,0	1,4	1,3
Fluvial	0,17		0,2		0,2	0,2	0,1
Divers	0,22		0,2		0,2	0,2	0,2
Total	44,6		44,6		48,9	39,4	31,2
Croissance p.r. à 2015			0%		10%	-12%	-30%
Réduction p.r. tendanciel					-2%	-30%	-54%

Exemple de calcul - Sources : calculs de la mission

Enfin, il reste les sujets comportementaux (prix, report modal, remplissage des véhicules, vitesse, gestion des véhicules autonomes,...) qui seront traités dans le chapitre final.

3. Panorama des exercices de prospective, programmations et scénarios postérieurs à 2013

Depuis le rapport de 2013, les circonstances ont notablement évolué. Les scénarios ont été consolidés et ont alimenté l'élaboration de politiques et stratégies nouvelles, elles-mêmes cohérentes avec les orientations européennes et internationales.

3.1. Principales évolutions du système des transports de 2013 à 2016

Les facteurs marquant de ces 3 dernières années sont les suivants :

- effondrement vers fin 2014 des prix du pétrole, passant de 100 à 50 \$ par baril environ.
- dérapage des émissions GES des transports à partir de 2015 (probablement à une augmentation de la consommation, elle-même liée à une baisse des prix des carburants), alors qu'elles semblaient stables auparavant
- progrès importants dans les batteries pour véhicules électriques, en performance et surtout en prix, avec l'apparition des premiers véhicules électriques « plaisir », certes en haut de gamme, mais préfigurant des véhicules attractifs en « moyen de gamme » dans quelques années, dont les premiers sont déjà pré-commercialisés
- apparition des premiers véhicules autonomes expérimentaux, avec des millions de km conduits sans conducteur, et de véhicules à forte assistance à la conduite, déjà commercialisés
- développement de nouvelles mobilités, grâce aux nouvelles technologies et notamment la diffusion large du smartphone
- sensibilisation croissante des populations et des décideurs mondiaux aux questions du changement climatique à l'occasion de la COP21 notamment
- jalons légaux posés, et notamment la loi de transition énergétique et pour la croissance verte, concernant une contribution carbone

En même temps, les contraintes budgétaires publiques se sont encore renforcées, la crise économique semble assez durable, la dette publique s'approche de 100 % du PIB.

Les objectifs que les pouvoirs publics s'étaient fixés en matière de parts modales ne sont pas en voie d'être atteints. En transport interurbain, les autocars librement organisés ont été autorisés. La commission Mobilité 21 a posé la base d'une limitation forte du développement des infrastructures interurbaines ferroviaires et la commission Duron celle de la limitation des dessertes de trains classiques interurbains dont l'équilibre économique était lointain.

Sur le plan du fonctionnement du système des transports, les régulateurs indépendants ou entités autonomes ont vu leurs compétences renforcées, et les collectivités locales ont bénéficié de nouvelles vagues de décentralisation. Une réforme du secteur ferroviaire a été mise en œuvre.

3.2. Regard sur les principaux enseignements transports du CGEDD en 2013

Le CGEDD notait que les diminutions maximales de GES envisageables dans les transports étaient de l'ordre d'un facteur 2 ou 2,5, sauf à envisager des changements radicaux dans l'organisation de la production, de la consommation et des modes de vie, ou l'effondrement de l'activité économique que personne ne souhaite.

Des exemples de calcul présentés ci-dessous conduisent, pour 2050 et hors transport aérien, à des potentiels de réduction plus élevés, allant dans le meilleur des cas à une division par 3 en 2050 par rapport à 1990 (et 3,5 par rapport à 2015) en format SECTEN. Les justifications en sont des débuts d'évaluations économiques qui laissent cependant de côté les mesures de coûts sociétaux apparemment disproportionnés, et aussi qui ne compromettent pas l'équilibre des finances publiques. Les évaluations sont faites en termes d'empreinte des transports, afin ne pas oublier l'énergie grise.

Catégories de Mesure	Réduction	1-réduction	Taux division
Motorisations, biocarburants, électrification des grands axes routiers	53%	47%	
Relèvement TICPE terrestre et ETS aérien	15%	85%	
Gestion urbaine, comportements	10%	90%	
Véhicule serviciel autonome partagé	20%	80%	
Total	71%	29%	3,5
Effet 1990/2015	-0,15	115%	
Total depuis 1990		33%	3,0

Exemple type de résultat de calcul économique de taux de réduction total sous certaines hypothèses et pour certains paramètres – source : calculs de la mission

Note de lecture : Pour la première catégorie, si la réduction est de $r_1=53\%$, $1-r_1=47\%$. Le taux global de réduction multiplication est r , soit 33% tel que $(1-r)=(1-r_1) \times (1-r_2) \times \dots \times (1-r_n)$. Il convient également de tenir compte de la hausse constatée de 1990 à 2015, soit environ 15% . Ce qui correspond à une division par 3 depuis 1990.

En revanche, le transport international aérien hors format SECTEN n'entre pas dans ce champ, et les spécificités du pouvoir réchauffant des émissions aériennes ne sont pas pris en compte ici.

Pourquoi un facteur 3 en 2016 et pas 2 à 2,5 comme en 2013 ?

- l'avenir s'est un peu ouvert sur le plan des technologies entre 2013 et 2016 (notamment sur les batteries, l'hydrogène...), laissant entrevoir de nouvelles possibilités ou bien crédibilisant celles qui étaient un peu émergentes encore
- les comportements des utilisateurs ont un peu évolué, les perspectives de faire évoluer les usages des transports avec les nouvelles technologies informatiques et de

communication se sont améliorées (exemple le développement du covoiturage⁶⁹ interurbain avec le smartphone)

- le contexte de mobilisation des acteurs en matière de gestion de la demande est plus favorable, compte tenu de la COP 21 et de la LTECV

- les perspectives de croissance économique sont plus faibles qu'autrefois ce qui déprime la consommation attendue

- et ce malgré un pétrole à 50 \$ le baril, sous réserve de restaurer un prix des carburants pas trop différent d'avant 2015 par la voie de la taxe carbone dans les prochaines années.

Pour atteindre ce facteur 3, il ne faudrait pas dévier par rapport à l'ensemble des mesures décrites dans ce scénario.

Il subsiste de nombreuses incertitudes, notamment sur :

- la disponibilité de bio-carburants à grande échelle sans entraver la filière agro-alimentaire, et/ou bien la possibilité de produire des carburants de synthèse à grande échelle à partir de filières de production d'énergies décarbonées (renouvelables ou nucléaires) excédentaires

- la croissance de la demande en transport aérien, et les spécificités de ce mode en matière de PRG relatif

- la croissance de la demande de transports terrestres et maritimes, liée notamment à la croissance économique et aux évolutions du prix du pétrole

- la capacité des collectivités locales à mettre en place des politiques urbaines novatrices et fortes

- les conséquences des véhicules autonomes sur la demande de transport et la possibilité de la maîtriser notamment par le partage de véhicules

Sur la méthode, le rapport de 2013 indiquait que « l'isolement d'un coût d'abattement propre aux différents secteurs des transports s'avère particulièrement difficile ».

Il s'agit d'un exercice rendu difficile du fait de la présence au sein des mesures étudiées le plus souvent de co-avantages ou de co-inconvénients significatifs au-delà des émissions de GES. Il y a parfois des cas où l'on peut dégager une première tendance, si l'on peut estimer un coût d'abattement par tCO₂, que l'on a estimé également les autres principaux co-avantages ou co-inconvénients, et que le signe probable des co-avantages (ou co-inconvénients) permet de dire si ce ratio est par excès ou par défaut, puis si cela permet de comparer avec une fourchette du raisonnable, si le sens de l'estimation (par excès ou par défaut) permet de conclure.

Pour les mesures technologiques, mais aussi celles de modération de la demande, les coûts de production du transport sont susceptibles d'évoluer fortement dans le temps, dans ce cas, l'estimation de coûts d'abattement devient plus incertaine, et seules des tendances générales peuvent alors être dégagées. Des questions de définition des situations de référence pour l'évaluation peuvent s'avérer complexes, notamment

⁶⁹ Le covoiturage consiste, sur un trajet donné intéressant au même moment plusieurs personnes, à se regrouper pour l'occasion et partager les frais de route avec le conducteur.

lorsqu'il faut choisir de prendre ou ne pas prendre en compte des normes probables mais peu optimisées.

Ce n'est toutefois pas par ce que c'est difficile qu'il ne faut pas le faire, Les éléments présentés ici illustrent une première approche, mais qui est souvent à compléter. Cela nécessiterait des ressources complémentaires dont la mission n'a pas disposé, mais qui sont probablement bien inférieures à la valeur des dommages liés au changement climatique si les émissions de GES n'étaient pas fortement réduites, parce que les co-inconvénients n'auraient pas été suffisamment minimisés, et donc le programme aurait été rendu inacceptable, ou bien parce que la valeur des co-inconvénients qu'on se serait imposé pour atteindre le facteur 4 serait inadéquate faute d'une évaluation économique satisfaisante.

Il est donc très important de poursuivre dans cette voie.

En synthèse sectorielle, le rapport de 2013, même s'il rappelait « *que des efforts continus et soutenus doivent continuer à être faits pour rééquilibrer les partages modaux de transports de marchandises, et pour développer les transports en commun et les modes doux dans les agglomérations* », soulignait que « *l'enjeu majeur reste la diminution des rejets unitaires des transports par route et des changements de comportements permettant de minimiser l'impact des transports les plus polluants* ».

C'est toujours aussi vrai en 2016 qu'en 2013, car même si les objectifs de partage modal sont loin d'être tenus, particulièrement en marchandises, ils ne font pas vraiment obstacle à un scénario ambitieux de division par 3 des émissions des GES dans les transports d'ici 2050, lequel ne comporte pas de mesures d'offre d'infrastructure de report modal lourd, ce qui accroît le réalisme budgétaire du scénario.

Les mesures de gestion de la demande, au-delà de la fiscalité carbone, n'ont du reste, en dehors de l'organisation future des services de mobilité en véhicule autonome partagé, que des impacts en première analyse assez modérés, moindre que l'incertitude sur les technologies, la croissance économique ou le prix du pétrole. Ce qui ne signifie pas qu'il ne faut pas les mettre en œuvre bien entendu, mais rester réaliste sur ce qui est possible.

Les questions d'accompagnement de la transition vers le véhicule électrique au quotidien, notamment celle de la disponibilité de prises électrique pour tous, apparaissent comme nouvelles par rapport à 2013.

La question de l'énergie et des GES « gris », donc des empreintes carbone de la production des véhicules et de leur démantèlement reste également majeure. Celle de l'impact carbone de l'empreinte au sol des transports et des infrastructures associées devrait également émerger. Il en va de même des risques de pénurie de surface utile sur la planète, susceptible de mettre les transports en conflit majeur avec la filière alimentaire.

Les évolutions du transport aérien sont également un sujet d'inquiétude accru, ce secteur ayant la capacité de faire échouer à lui tout seul la démarche facteur 4.

3.3. Regard sur les principales recommandations touchant les transports dans le rapport du CGEDD en 2013

Le rapport « facteur 4 » du CGEDD de 2013 donnait 33 recommandations, dont certaines concernaient principalement les transports.

7 Développer la recherche sur les composantes de la demande de transport de marchandises à longue distance et ses déterminants

Ces données sont importantes, et ont motivé la mise en place d'un observatoire suite à la conférence logistique de 2014, avec par exemple la reconduction de l'enquête chargeurs ECHO sur le lien entre transport et industrie/distribution. Il y a bien un Intérêt à conduire une réflexion sur la modélisation du transport de fret pour développer les outils d'évaluation des politiques publiques dans ce domaine. La recommandation reste donc valable et a eu un début d'application grâce à la conférence logistique. Une revue bibliographique reste à faire, et de nombreux problèmes à étudier.

8 Favoriser les nouveaux services de mobilité décarbonée, notamment dans l'habitat diffus.

La recommandation reste utile. Des initiatives récentes sont à noter, comme la promotion des territoires à énergie positive pour la croissance verte, les territoires hydrogène, le développement de bornes de recharge pour réaliser à terme un maillage territorial, etc. La mobilité dans l'habitat diffus repose essentiellement sur la voiture. Des initiatives sont possibles au niveau de la motorisation (on observe par exemple un développement du véhicule électrique), de l'utilisation des véhicules (covoiturage, transport à la demande), voire du recours à d'autres modes de transport. Une telle recommandation permet aussi de mieux sensibiliser l'espace rural.

16 Développer les recherches sur les causes de l'artificialisation des sols (tenant notamment à la dérégulation du foncier et au droit de l'urbanisme) qui favorisent le développement de l'habitat dispersé et les déplacements motorisés

Il existe une littérature académique abondante sur les interactions transport-urbanisme, des travaux par la SGP (Société du Grand Paris) de comparaison de modèles LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) au niveau national. Mais les recherches sont coûteuses et requièrent de l'expertise rare, d'où l'intérêt de mutualiser les efforts, avec des souhaits d'animation au niveau national d'une communauté des modélisateurs LUTI (État, régions, agglomérations, SGP...) pour mettre en commun les expériences et favoriser la cohérence d'ensemble. La recommandation reste valable.

17 Développer études et recherches sur les conséquences en termes d'émissions de GES des différentes formes d'artificialisation des sols et notamment de l'éclatement urbain.

Des recherches nombreuses existent, qu'il s'agisse d'études d'élasticité précises sur l'empreinte carbone du développement des banlieues (vivre en couronne consomme six pleins d'essence de plus par an par foyer ; doubler la densité résidentielle résulte en l'économie de deux pleins par an par foyer...) ou de considérations plus générales sur la ville durable⁷⁰. Voir recommandation 16.

26 Développer la recherche sur les élasticités de la consommation d'énergie à l'offre, à court et à long terme, par secteur,..

Les données en la matière existent mais sont parcellaires et l'offre est en pleine évolution, la recherche additionnelle reste donc utile.

29 Faire des paris, notamment à l'occasion de la réflexion sur les normes de construction pour 2020, sur les développements de l'énergie 2.0. et en tout cas laisser ouvertes les possibilités de déploiement de ces systèmes.

⁷⁰ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Etalement-urbain-et.html>

Des réflexions sont en cours à ce sujet⁷¹, par exemple au sein du plan bâtiment durable dans la perspective des nouvelles réglementations, ou au sein de la DGEC sur l'autoproduction et l'autoconsommation, et plus généralement sur la question de la stabilité des réseaux. Le sujet dépasse d'ailleurs le secteur du bâtiment. La problématique du véhicule électrique et de l'exigence en termes de pics de puissance requis par la charge d'un parc conséquent (mais aussi des bénéfices du recours aux batteries de ce parc pour stabiliser le réseau), ou la disponibilité de points de charge chez soi et au bureau, en est un exemple. Les appels à projet « territoires à énergie positive pour la croissance verte », le déploiement des compteurs intelligents ou des réseaux intelligents peuvent constituer des expérimentations instructives. La recommandation reste d'actualité.

3.4. Regard sur les volets mobilité divers exercices de prospective et scénarios de long terme

Plusieurs scénarios ont été produits depuis 2013. Sont analysés ici leur volet transports et mobilité.

3.4.1. La vision de l'ADEME 2030 et 2050 : globalement assez réaliste, avec toutefois des interrogations sur le réalisme du report modal et de la maîtrise de la demande envisagés

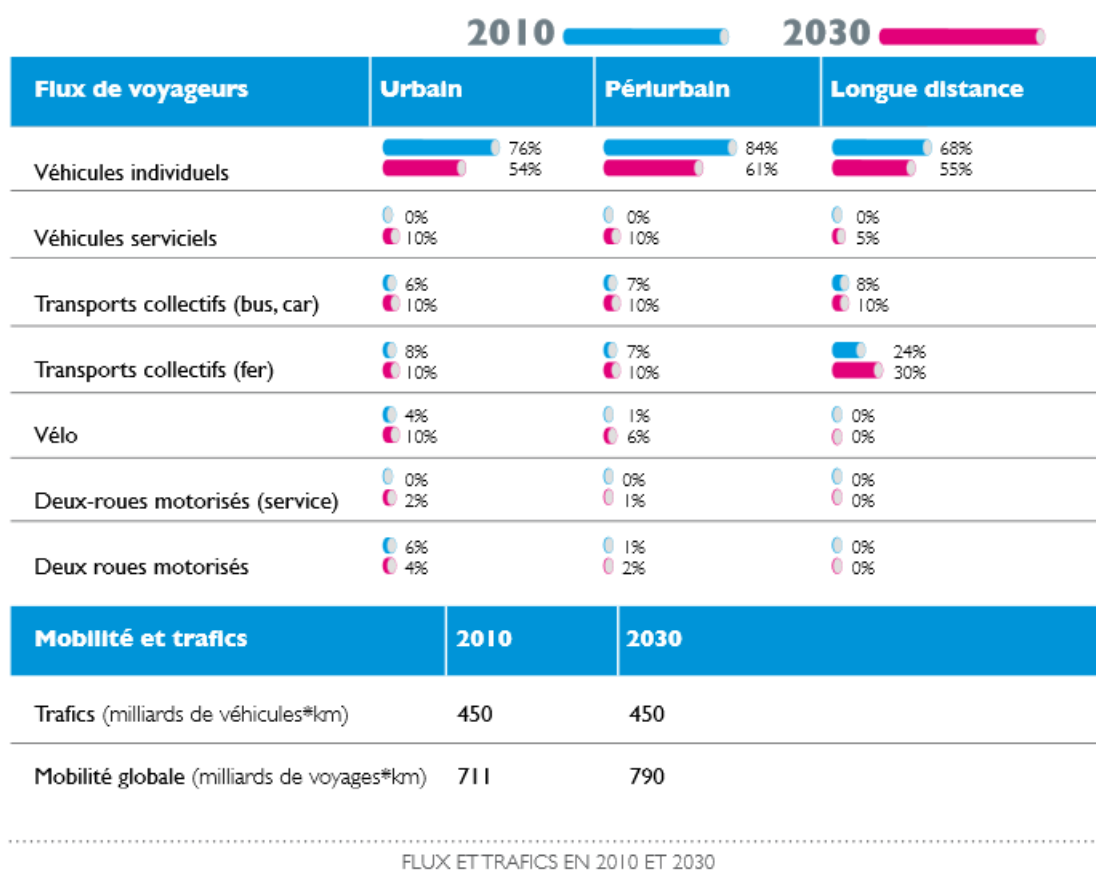
La Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050⁷² est tendancielle mais volontaire jusqu'à 2030 et normative jusqu'à 2050 (c'est-à-dire qu'on suppose l'objectif facteur 4 atteint en 2050, tous secteurs confondus).

3.4.1.1. Étape 2030 de la vision ADEME

Pour ce qui concerne les transports, l'ADEME vise en 2030 une mobilité par personne à peu près constante en distance, mais différente. Les services de mobilité, notamment électriques, se développent pour atteindre 10 % des flux voyageurs urbains et périurbains en 2030. Le covoiturage se développe, et le report modal évolue vers les TC et les modes doux continue.

⁷¹ Pour mémoire, l'expression « énergie 2.0 » renvoie à un nouveau modèle du secteur de l'énergie, intégrant production, consommation et décision décentralisée, stockage de l'énergie, réseaux intelligents, et de manière générale convergence avec et recours important aux technologies de l'information et de la communication

⁷² <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>



Flux et trafics routiers en 2010 et 2030 - Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050,
<http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Le scénario inclut également des « véhicules mieux adaptés », plus efficaces et moins émetteurs.

Des véhicules mieux adaptés

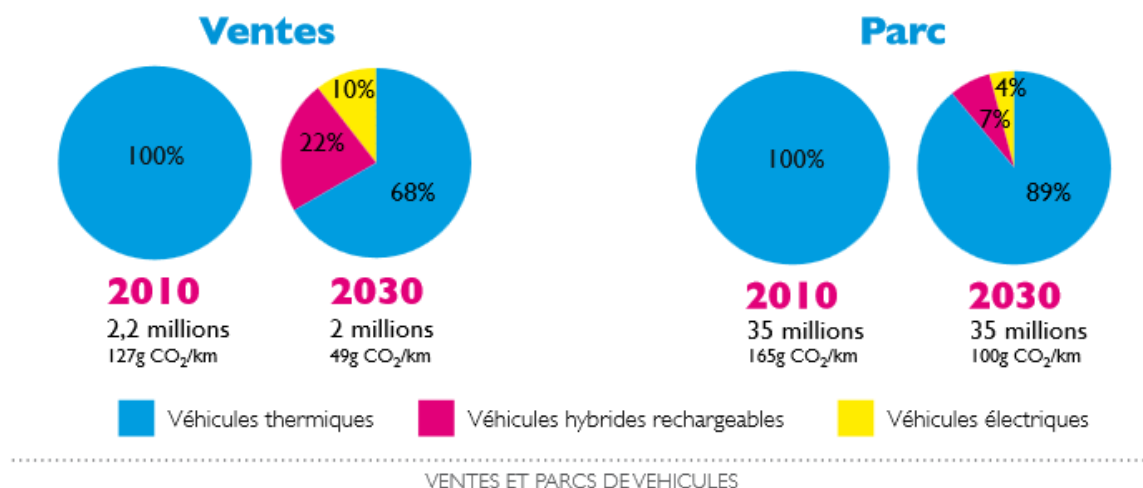
Du point de vue technologique, les motorisations thermiques continuent de s'améliorer et le parc intègre de plus en plus de véhicules hybrides non rechargeables. De nouvelles motorisations apparaissent sur le marché : principalement des véhicules hybrides rechargeables plug-in (à double motorisation et qui se rechargent sur le secteur), ainsi que des véhicules électriques surtout achetés par les professionnels et déployés par les services de mobilité. Les émissions moyennes du parc automobile passent ainsi de 167 g CO₂/km aujourd'hui à 100 g CO₂/km en 2030. Alors que les véhicules neufs émettaient, en 2010, 127 g CO₂/km en moyenne, la moyenne pondérée des véhicules neufs de 2030 émettra 49 g CO₂/km (les véhicules électriques n'émettent pas de CO₂ à l'usage, les VHR émettent environ 30 g CO₂/km, et les véhicules thermiques entre 50 et 100 g CO₂/km). Les surfaces de terres cultivées pour les biocarburants n'augmentent pas tandis que la part des biocarburants de 2ème génération progresse aux dépens de ceux de 1ère génération (0,9 Mtep de biocarburants 2ème génération sur 3 Mtep de biocarburants en 2030).

Des véhicules mieux adaptés : de 127 g CO₂/km d'émissions, en moyenne, pour les véhicules neufs aujourd'hui, à 49 g CO₂/km en 2030

Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050,
<http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Pour mémoire en Europe en 2015 les émissions sont de 130 gCO₂/km pour les véhicules neufs, avec pour perspectives normatives en 2020 95gCO₂/km, et en 2030 68 gCO₂/km. Le scénario proposé est volontaire.

Le diagramme ci-dessous illustre les ventes de véhicules neufs (probablement VP) par type en 2010 et en 2030, ainsi que le parc aux mêmes dates.



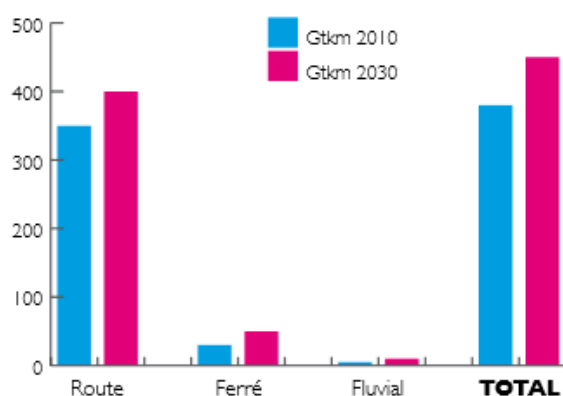
Ventes et parcs de véhicules en 2010 et 2030 - Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Le transport de marchandises croît légèrement et reste fortement marqué par la route.

Le transport de marchandises encore fortement marqué par la route

L'évolution du transport de marchandises est très impactée par la croissance du PIB.

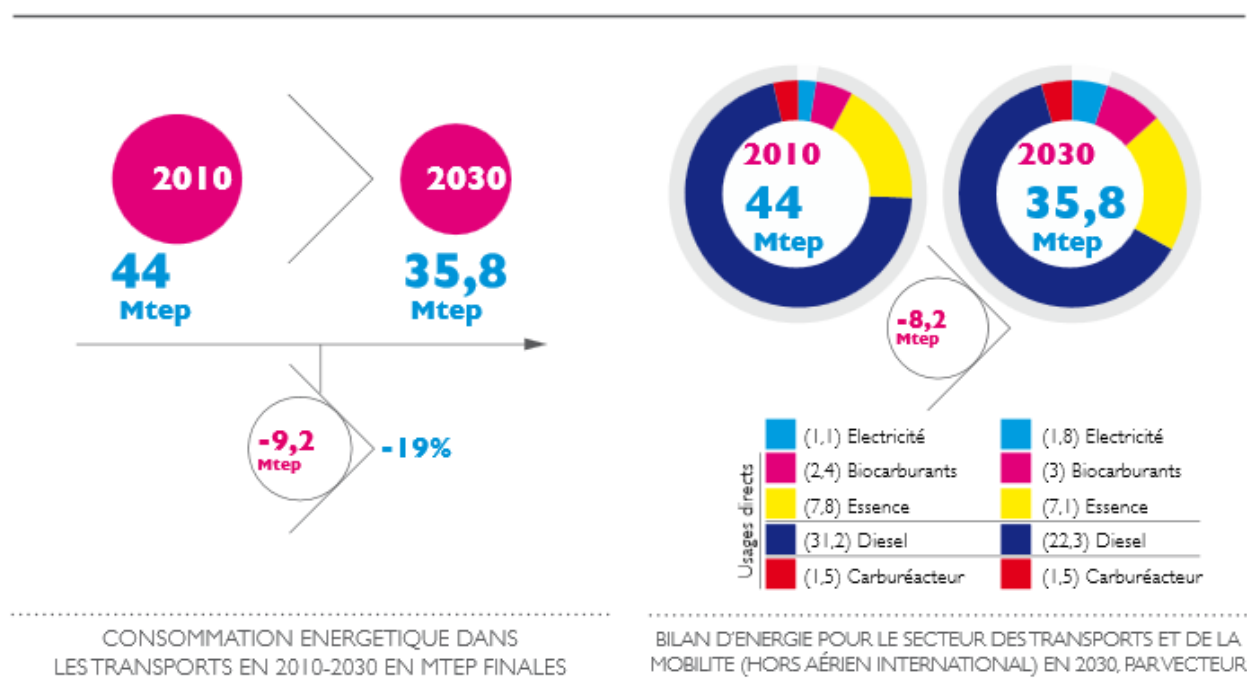
On fait l'hypothèse d'une décorrélation par rapport au PIB (la croissance du transport routier de marchandises passe de 2,1%/an aujourd'hui à 0,8%/an en 2030) ainsi que des reverts modaux significatifs vers le fer (qui retrouve son niveau de 1990) et le fluvial. Toutefois, le transport routier progresse et les besoins en transport de marchandises (en tonnes-kilomètre) continuent de croître jusqu'en 2030.



TRANSPORT DE MARCHANDISE EN GTKM EN 2030, PAR MODE

Ventilation par mode du transport de marchandises en milliards de tonnes.kilomètres en 2030 - Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Au total, pour la partie transports, l'ADEME arrive au bilan suivant, qui projette une baisse d'environ 20 % des consommations entre 2010 et 2030 :



Consommation et bilan énergétique des transports en 2010 et 2030 - Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Bilan des émissions de gaz à effet de serre en Mt CO₂ eq

	1990				2030			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES
Industrie								
Combustion	79,9			79,9	49,8			49,8
Process	25,2		23,6	48,8	21,2		2,6	23,8
Résidentiel principal								
Combustion	67,2			67,2	20,8			20,8
Autres		4,3	0,9	5,2		5,5	1,0	6,5
Tertiaire								
Combustion	28,7			28,7	9,0			9,0
Autres				0,0				0,0
Transports								
Combustion	113,3			113,3	96,8			96,8
Autres				0,0			1,0	1,0
Agriculture								
Combustion	8,7			8,7	5,5			5,5
Autres		51,6	36,6	88,2		33,8	30,3	64,1
Production d'énergie	62,1	6,8		68,8	19,4	0,1181	0,5254	20,0
Déchets	1,7	11,3	1,4	14,4	1,4	12,5	1,2	15,2
Solvants	1,8			1,8	1,0			1,0
Total	388,7	73,9	62,6	525	225,0	51,9	36,7	313 (-40%)

ÉVOLUTION DES GAZ À EFFET DE SERRE (GES) 1990-2030

Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050,
<http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

3.4.1.2. Étape 2050 de la vision ADEME

Pour 2050, afin de tenir l'objectif du facteur 4, l'ADEME semble miser assez largement sur une baisse de mobilité globale, de 20 % par personne.

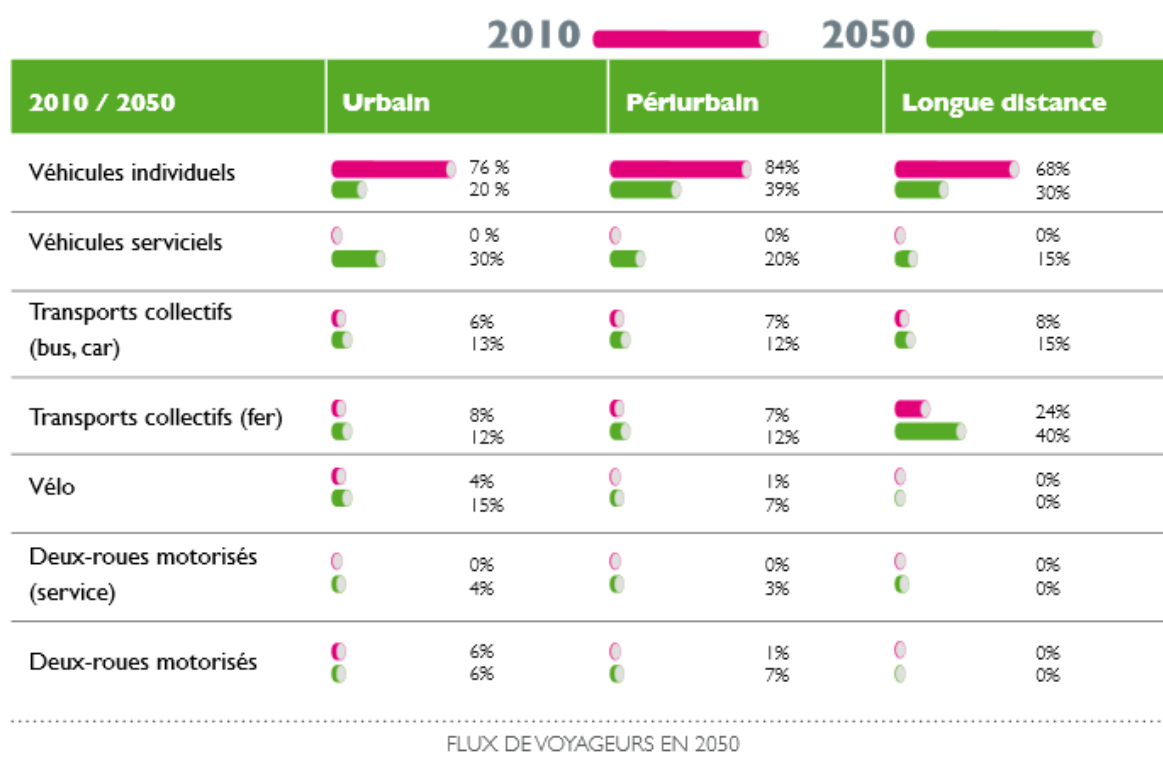
Elle mise sur de nombreux services de mobilité, sur un doublement des flux des TC, et sur un quadruplement des 2 roues motorisés et des vélos.

En 2050, on suppose que la mobilité par personne décroît de 20 % notamment en raison de la part accrue de télétravail, du vieillissement important de la population, ainsi que grâce à une meilleure organisation urbaine.

Une mobilité plus fluide et plus efficace

En 2050, les services de mobilité représentent 30 % des flux de voyageurs en zone urbaine ; le flux de voyageurs en transports collectifs est doublé par rapport à aujourd'hui, les transports en deux roues motorisés et vélo sont multipliés par quatre.

Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>



Flux de voyageurs terrestres en 2050 - Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Pour le parc des VL (VP et VUL), la répartition envisagée des modes de motorisation serait de 1/3 moteur thermique, 1/3 VHR et 1/3 VE, avec davantage de mutualisation, et des véhicules urbains et longue distance plus différenciés.

Un parc largement modifié pour une indépendance pétrolière en 2050

En 2050, pour répondre à cette mobilité, le parc serait moins important qu'aujourd'hui avec 22 millions de véhicules contre 35. Cette hypothèse ambitieuse suppose que la voiture n'est plus majoritairement un bien acheté par le particulier, mais aussi un mode de transport intégré dans un offre bien plus large : les véhicules sont mutualisés, servent plusieurs fois dans une même journée et transportent plus de voyageurs. Ils sont aussi mieux adaptés à chaque type de trajet avec des différenciations plus fortes entre véhicules urbains et véhicules longue distance, et sont ainsi plus efficaces énergétiquement. Le parc comporterait alors 1/3 de véhicules « thermiques », 1/3 de véhicules hybrides rechargeables et 1/3 de véhicules électriques.

Véhicules (dont VP-VUL)	Ventes 2050	Parc 2050
Véhicules thermiques	34%	34%
Véhicules hybrides rechargeables	38%	38%
Véhicules électriques	28 %	28%
Total	1,2 millions	22 millions

VENTES ET PARC DE VEHICULES EN 2050

Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Une partie des véhicules thermiques pourrait rouler au gaz, mais sans effet déterminant sur les émissions de GES. Les bio-carburants de 2ème et 3ème génération seraient amenés à se développer.

Un parc largement modifié pour une indépendance pétrolière en 2050

En 2050, pour répondre à cette mobilité, le parc serait moins important qu'aujourd'hui avec 22 millions de véhicules contre 35. Cette hypothèse ambitieuse suppose que la voiture n'est plus majoritairement un bien acheté par le particulier, mais aussi un mode de transport intégré dans un offre bien plus large : les véhicules sont mutualisés, servent plusieurs fois dans une même journée et transportent plus de voyageurs. Ils sont aussi mieux adaptés à chaque type de trajet avec des différenciations plus fortes entre véhicules urbains et véhicules longue distance, et sont ainsi plus efficaces énergétiquement. Le parc comporterait alors 1/3 de véhicules « thermiques », 1/3 de véhicules hybrides rechargeables et 1/3 de véhicules électriques.

Véhicules (dont VP-VUL)	Ventes 2050	Parc 2050
Véhicules thermiques	34%	34%
Véhicules hybrides rechargeables	38%	38%
Véhicules électriques	28 %	28%
Total	1,2 millions	22 millions

VENTES ET PARC DE VEHICULES EN 2050

Vente et parc de véhicules légers routiers en 2050 - Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Une partie des véhicules thermiques pourrait rouler au gaz, mais sans effet déterminant de réduction sur les émissions de GES. Les bio-carburants de 2ème et 3ème génération seraient amenés à se développer.

Sur ces 22 millions de véhicules, 12 millions seraient possédés, 5 millions seraient en autopartage, et 5 millions seraient des véhicules utilitaires légers.

Il est apparu au cours de nos travaux que la réduction importante des besoins en chaleur dans le secteur du bâtiment permettrait de libérer un potentiel d'ENR pouvant être affecté au secteur des transports par le biais du réseau de gaz. Ainsi, les véhicules thermiques passeraient progressivement du pétrole au gaz, dont une part importante est renouvelable. Couplé au développement de la 2ème voire 3ème génération de biocarburants, la France pourrait alors être indépendante de la ressource pétrolière à l'horizon 2050. Cette évolution du carburant utilisé n'est toutefois pas structurante pour la réalisation du Facteur 4, les changements structurels étant liés au report modal vers l'autopartage, le transport collectif et les modes doux ainsi que la pénétration des véhicules électriques et hybrides rechargeables. Si le vecteur utilisé restait issu des produits pétroliers, les émissions moyennes du parc seraient de 49 g CO₂/km en 2050.

En 2050, les services de mobilité représentent 30 % des flux de voyageurs dans l'urbain

Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Pour le transport de marchandises, l'ADEME propose une approche systémique, avec une inflexion forte sur la demande et un renforcement considérable de la part modale des modes non routiers.

Une approche systémique du transport de marchandises

Dans le scénario normatif 2050, une rupture est projetée avec un retour du trafic de marchandises en tonnes-kilomètres au niveau de 2010. Cette rupture est possible sous condition de mise en œuvre d'une politique systémique alliant des efforts importants sur la logistique, sur les emballages et sur l'adéquation entre lieux de production et lieux de consommation. La part modale du transport ferré et du transport par voie fluviale et maritime augmente sensiblement. Les poids lourds restent en dehors des villes et déposent leurs marchandises dans des centres logistiques qui les acheminent ensuite dans les centres urbains par des véhicules plus légers.

Mode de transport	Trafic marchandise 2010, en Gt.km	Trafic marchandise 2050, en Gt.km
Routier	340	262
Ferroviaire	34	100
Fluvial et maritime intérieur	8	20
Total	382	382

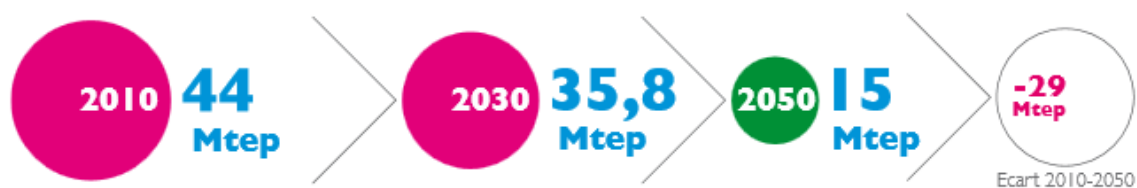
* La Gt.km est l'unité de mesure usuelle du transport de marchandises. Elle équivaut à 1 milliard de tonnes de marchandises transportées sur 1 km.

TRANSPORT DE MARCHANDISES PAR MODE EN 2050, EN GTKM

Ventilation par modes du transport de marchandises en milliards de tonnes.kilomètre -
Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

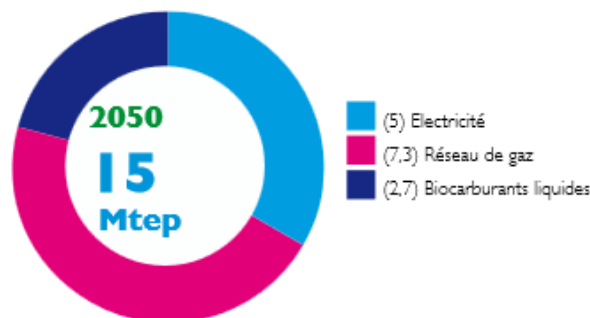
En termes de résultat global de consommation d'énergie, ces évolutions aboutissent pour le secteur des transports à une division par presque 3 des consommations en 2050 par rapport à 1990 :

Bilan énergétique du secteur des transports



BILAN DU SECTEUR DES TRANSPORTS EN 2010, 2030 ET 2050 EN MTEP FINALES

Si nous faisons l'hypothèse que les véhicules thermiques roulent au gaz, le mix énergétique du secteur des transports est le suivant :



BILAN DU SECTEUR DES TRANSPORTS EN 2050, PAR VECTEUR

Bilan énergétique du secteur des transports en 2050 - Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

Enfin, en termes d'émissions de GES, les hypothèses de la vision 2050 conduisent à une évolution de 113,3 MtCO₂éq en 1990 à 8,5 MtCO₂éq en 2050, soit une chute de 92,5 %, ou encore la réalisation par le secteur des transports d'un facteur 13 de réduction. Il s'agit de la conséquence de multiples hypothèses favorables (baisse de la demande, report modal, électrification des transports, décarbonation de l'électricité, etc.)

Bilan des émissions de gaz à effet de serre en Mt CO₂ eq

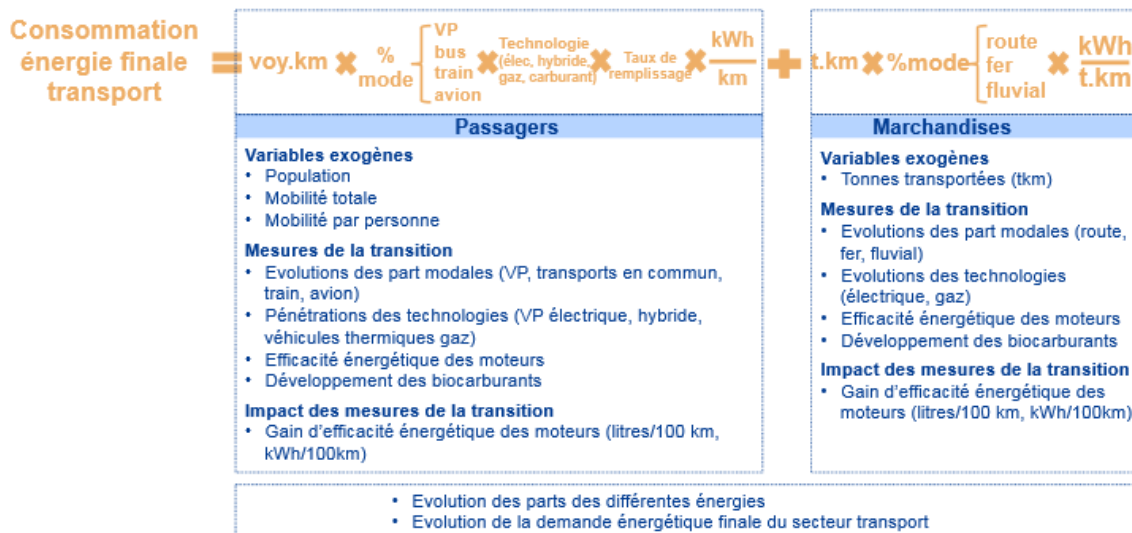
	1990				2050			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Total GES
Industrie								
Combustion	79,9			79,9	35,5			35,5
Process	25,2		23,6	48,8	17,1		1,8	18,8
Résidentiel principal								
Combustion	67,2			67,2	4,8			4,8
Autres		4,3	0,9	5,2		0,1	0,0	0,1
Tertiaire								
Combustion	28,7			28,7	1,3			1,3
Autres				0,0				0,0
Transports								
Combustion	113,3			113,3	8,5			8,5
Autres				0,0			0,0	0,0
Agriculture								
Combustion	8,7			8,7	3,9			3,9
Autres		51,6	36,6	88,2		22,0	24,9	46,9
Production d'énergie	62,1	6,8		68,8	3,1	0,0		3,1
Déchets	1,7	11,3	1,4	14,4	0,7	6,3	0,6	7,6
Solvants	1,8			1,8	10,5			0,5
Total	388,7	73,9	62,6	525	75,4	28,4	27,3	131 (-75%)

ÉVOLUTION DES GAZ À EFFET DE SERRE (GES) 1990-2050

Source: Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, <http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050>

3.4.2. Les scénarios DNTE

Le diagramme suivant représente l'architecture globale de l'approche retenue lors du débat national sur la transition énergétique (DNTE).



Source : Etude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEED, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

Ce débat national sur la transition énergétique (DNTE) a émis en juillet 2013 quatre trajectoires récapitulant divers scénarios⁷³ : la trajectoire DEC (demande forte et décarbonation par l'électricité) incarnant le scénario Négatep normatif facteur 4 sur les émissions de CO2 liées au secteur de l'énergie, la trajectoire DIV (demande moyenne et diversité des vecteurs) incarnant le scénario ANCRE DIV normatif visant le facteur 4 en 2050 et 50 % de nucléaire en 2025, la trajectoire EFF (efficacité énergétique et diversification des vecteurs) incarnant le scénario ADEME avec pour 2030 une vision volontariste de maîtrise de la consommation et de développement des renouvelables et une approche normative pour 2050, et enfin la trajectoire SOB (sobriété énergétique et sortie du nucléaire) incarnant le scénario négaWatt normatif facteur 4 de sortie du nucléaire et des fossiles avec des étapes décennales construites en fonction des potentiels de sobriété, d'efficacité énergétique et de développement des renouvelables.

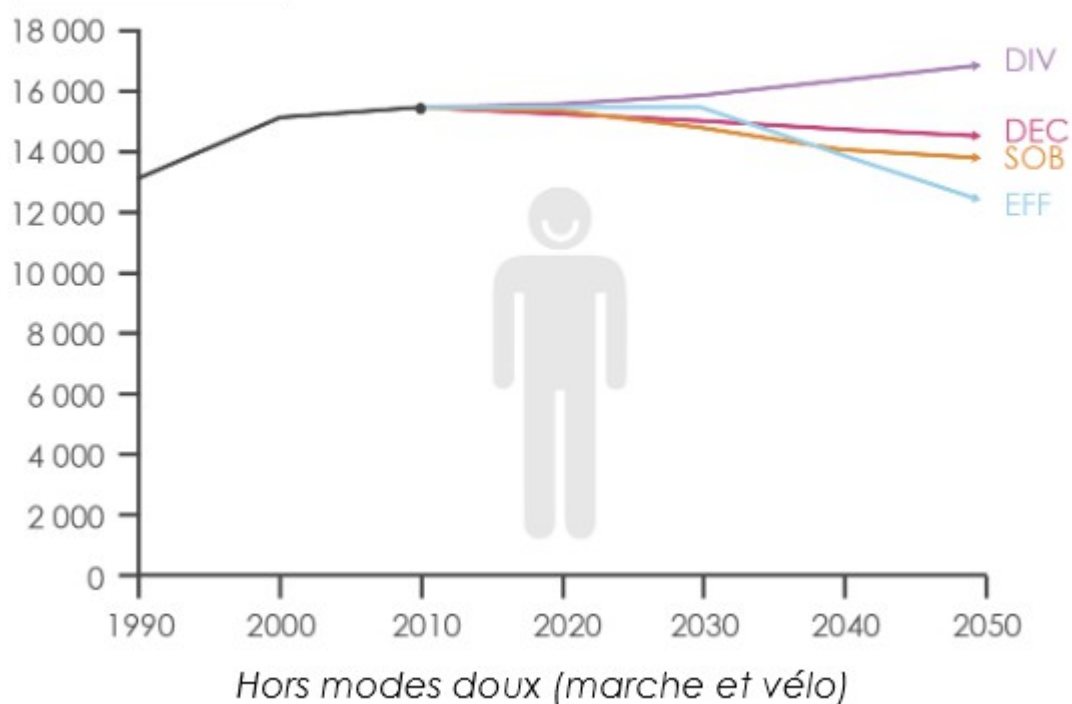
Du point de vue du secteur des transports, les quatre scénarios se différencient tout d'abord par l'évolution de la mobilité par habitant, et de la mobilité marchandises.

En ce qui concerne le transport de passagers, « La mobilité totale diffère de façon significative dans les 4 trajectoires, passant de 974 milliards de voyageurs.km (Gvoy.km) en 2010 à 1219 Gvoy.km pour la trajectoire DIV (la plus haute, correspondant à une prolongation de la tendance à la hausse de la mobilité), à la stabilité de cette mobilité (974 Gvoy.km en 2050), pour les trajectoires DEC et SOB. La trajectoire EFF présente un effet particulier de hausse à 2030, puis retour au niveau de 2010 à 2050, qui est dû à la méthode de modalisation exploratoire sur la période 2010-2030 et normative à 2050. ». Pour le transport de marchandises, la trajectoire DIV atteint 700 Gt.km en 2050 soit un doublement alors que les autres trajectoires restent à peu près au niveau de 2010

⁷³ http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

Mobilité totale par habitant

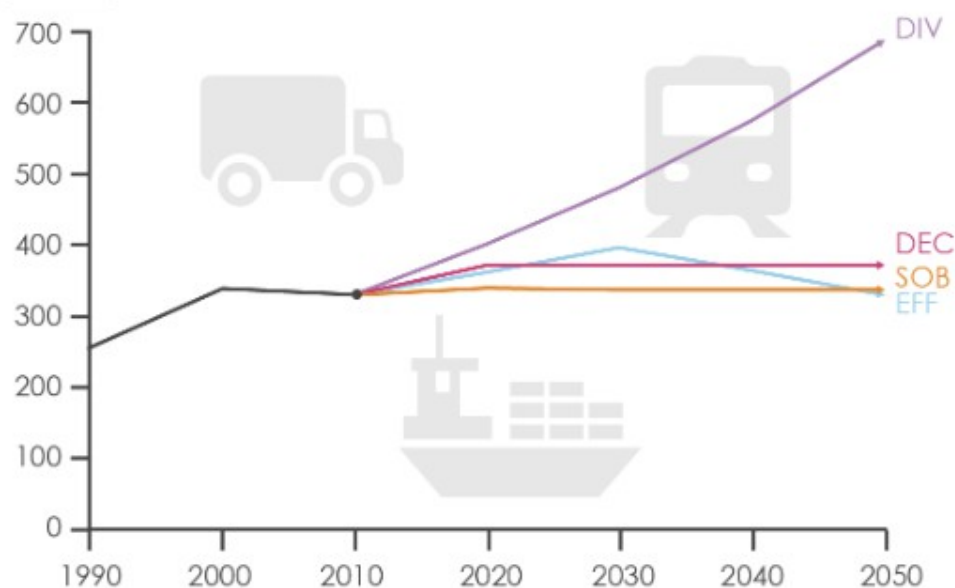
Km / habitant / an



Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEEID, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

Transport de marchandises, tonnes transportées

Gt.km



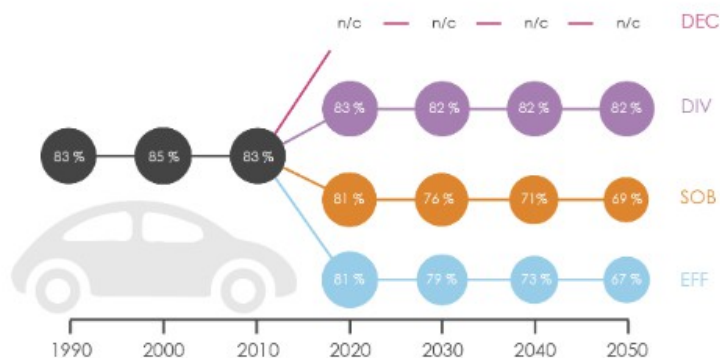
Remarque : Hors oléoducs, hors transport international aérien et maritime

Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEEID, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

Puis chaque scénario fait évoluer les parts modales, en passagers et en marchandises.

Part modale de la voiture* dans le transport de passagers

Part (%)



Part modale des véhicules (véhicules particuliers, serviciels et VUL) et 2 roues motorisés dans le transport de passagers, hors modes doux (marche et vélo)

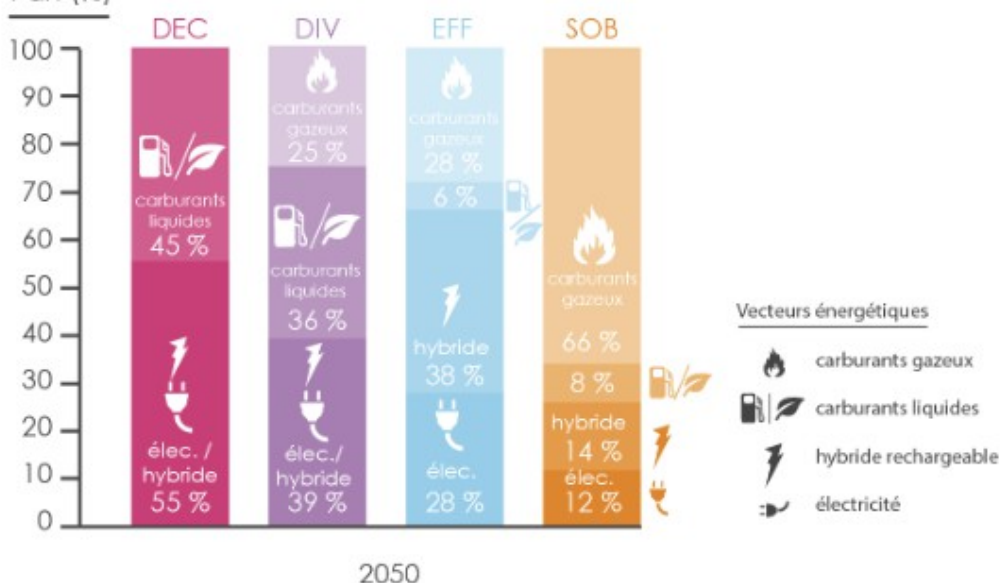
*Périmètre: véhicules particuliers, véhicules serviciels, 2 roues motorisés et part de la mobilité en véhicules utilitaires légers

Part modale de la voiture dans les transports de passagers - Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEEID, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

La motorisation du parc des VP en 2050 est également décrite dans chaque scénario.

Parc de véhicules particuliers en 2050

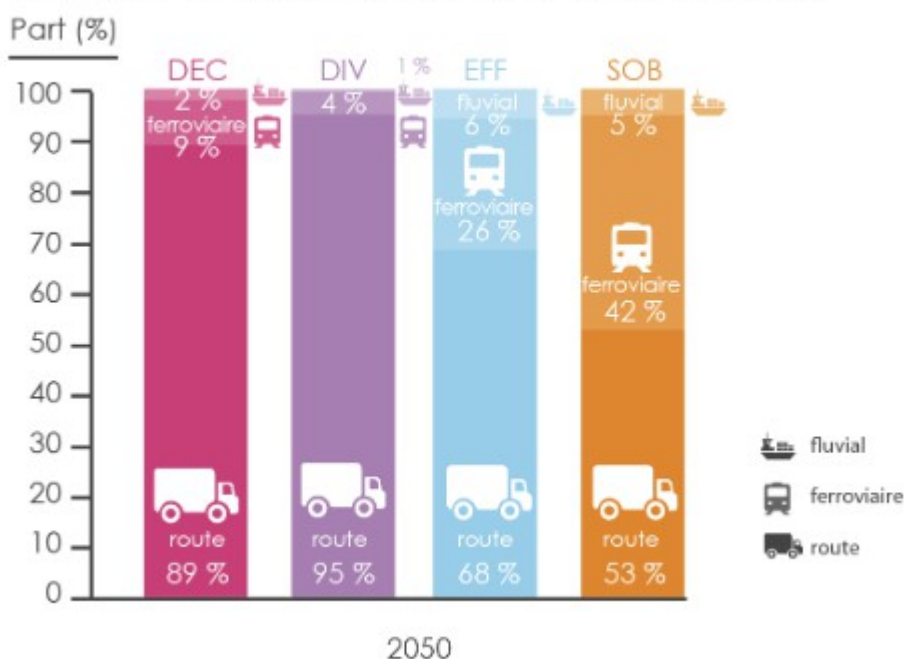
Part (%)



Parc de véhicules particuliers en 2050 - Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEEID, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

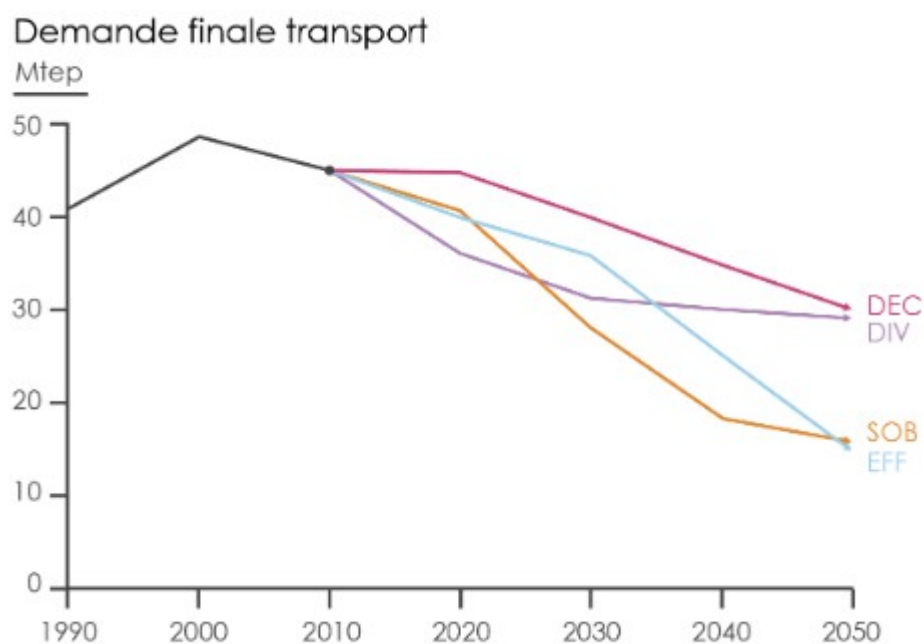
En marchandises, chaque scénario définit ses parts modales également.

Transport de marchandises par mode en 2050



Ventilation par modes du transport de marchandises en 2050 - Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEEID, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

On aboutit à des évolutions de la demande finale d'énergie liée aux transports dans chaque scénario, allant d'une réduction d'environ 1/3 à une réduction de 2/3 selon les scénarios. En 2050, les trajectoires DEC et DIV aboutissent à une baisse d'un tiers de la demande d'énergie finale des transports, SOB et EFF à une baisse de deux tiers.



Demande énergétique finale du secteur des transports entre 1990 et 2050 - Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEEID, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

Les mix énergétiques diffèrent aussi selon les scénarios.

2010		2050	Mix énergétique final du secteur transport en 2050			
Mtep	Trajectoire	Mtep	Electricité	Gaz de réseau	Pétrole	Biocarburant
45	DEC	30	27%	0%	23%	50%
	DIV	29	11%	23%	33%	34%
	EFF	15	34%	49%	0%	17%
	SOB	16	17%	63%	8%	12%

Source : Étude des 4 trajectoires du DNTE, étude pour le MEDDE, CGDD, SEEID, 2014, <http://transitionenergetique.org/wp-content/uploads/2013/07/Synthe%CC%80se-DNTE-18-juillet-2013-2.pdf>

Les mesures illustratives sont les suivantes :

Trajectoire	Principales mesures quantifiées	Stratégie
DEC	<ul style="list-style-type: none"> •efficacité énergétique des moteurs : parc VP 7 l/100km → 3 l/100 km en 2050 •parc de véhicules en 2050 : remplacement de 15 Mtep de pétrole par 5 Mtep d'électricité (véhicules électriques et hybrides) •biocarburants : 15 Mtep de biocarburants en 2050 	Pour réduire très fortement le pétrole dans les transports, la trajectoire repose sur une double révolution : repenser la mobilité transports en commun et du fret (forte augmentation des transports en commun et ferroviaires électrifiés de 1 à 3 Mtep), et remplacer le pétrole par l'électricité la moins « carbonée » possible, soit directement via des véhicules hybrides rechargeables ou électriques, soit en apportant une partie de l'énergie nécessaire à la synthèse des biocarburants.
DIV	<ul style="list-style-type: none"> •efficacité énergétique des moteurs : parc VP 7 l/100km → 2 l/100 km en 2050 •parc de véhicules en 2050 : 75% du parc de VP électriques ou hybrides en 2050, le reste en véhicules thermiques gaz • biocarburants : 10 Mtep de biocarburants + 1 Mtep de biogaz en 2050 	<p>Amélioration de l'efficacité énergétique accélérée</p> <ul style="list-style-type: none"> -véhicules 2l/100km se généralisent dès 2030 <p>Pénétration du gaz</p> <ul style="list-style-type: none"> -2030 : Couloir GNL pour les camions et flotte captive -2050 : 50% des Bus GNV, 25% des VP <p>Développement massif des bio-carburants (maintien 1^{ère} Génération et développement 2^{ème} Génération)</p> <ul style="list-style-type: none"> -2030 : Production x 2,5 (6 Mtep primaires) -2050 : Production x 6 (13 Mtep primaires)
EFF	<ul style="list-style-type: none"> •efficacité énergétique des moteurs : -64% sur MJ/km grâce à l'amélioration de l'efficacité des moteurs et à l'électrification du parc VP, et division par 3 des 	Changement de paradigme vis-à-vis de la mobilité individuelle : l'usage du moyen de transport prend le dessus sur sa possession. Pénétration importante des services de mobilité (30% urbain avec véhicules mieux

	<p>MJ/passager.km notamment par une meilleure adéquation usage/type de véhicule</p> <p>• parc de véhicules en 2050: 1/3 de véhicules hybrides rechargeables, 1/3 de véhicules électriques, 1/3 de véhicules « thermiques » dont majorité gaz en 2050</p> <p>• biocarburants : 7 Mtep de carburants liquides et gazeux d'origine biosourcée, biokérozène inclus</p> <p>• dans le secteur ferroviaire, le remplacement du parc roulant permet des gains de consommation de 30%.</p>	<p>adaptés) et report vers les transports collectifs (doublement) et les modes actifs. Réduction du parc de véhicules en conséquence.</p> <p>Indépendance vis-à-vis du pétrole possible en passant au mélange biogaz/GNV dans les véhicules thermiques (avec un réseau de gaz pour moitié décarboné), à l'électricité, ainsi qu'aux biocarburants 2G.</p> <p>Décorrélation du transport de marchandises par rapport au PIB, reports modaux significatifs vers le fer et le fluvial.</p>
SOB	<p>• efficacité énergétique des moteurs : parc VP 7 l/100km → 3 l/100 km en 2050</p> <p>• parc de véhicules en 2050 : 1/4 véhicules électriques et hybrides, et 95% véhicules thermiques au gaz</p> <p>• fret :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Part modale du secteur routier diminuée de 38% ○ Part modale du ferroviaire augmentée de près de 300% ○ Part modale du fluvial augmentée de 150 % 	<p>Report modal de la voiture vers les transports en commun et les modes actifs (vélo, 2 roues)</p> <p>Augmentation du taux de remplissage des voitures individuelles (de 1,82 à 2,38) et des transports en commun (de 33 à 50% pour les bus/cars)</p> <p>Amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs</p> <p>En milieu urbain : plus aucun moteur thermique en 2050</p> <p>Changement de combustible : parc de voiture à moteur thermique alimenté à 95% en gaz en 2050.</p> <p>Développement des services de mobilité (voitures partagées, taxis collectifs, etc.)</p> <p>Réduction de la vitesse sur route et autoroute</p>

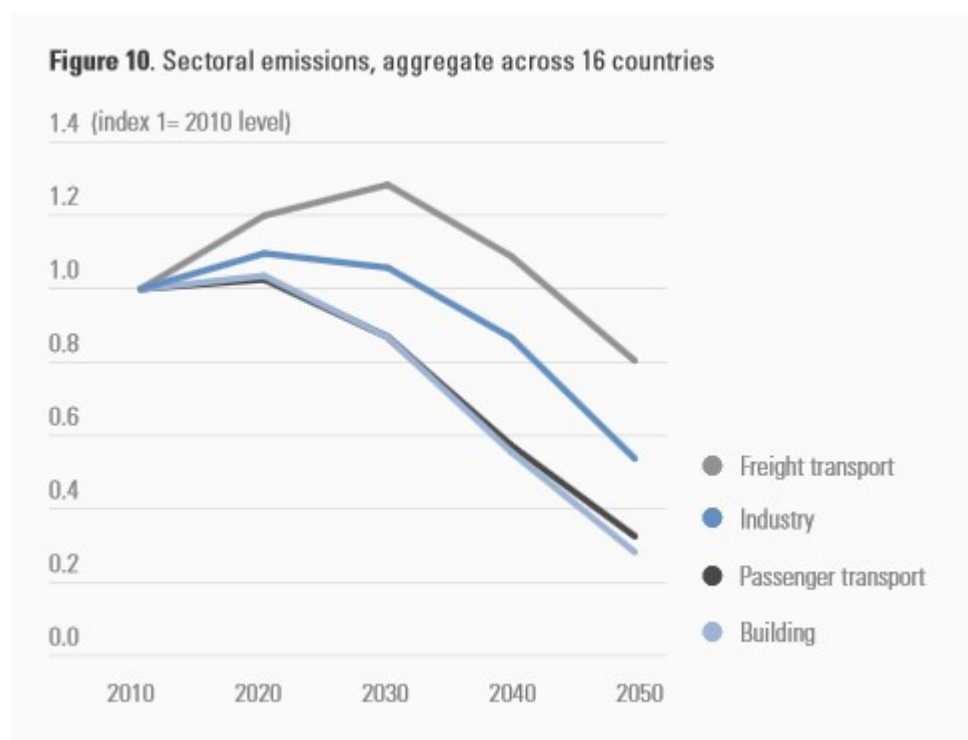
Source : *Étude des quatre trajectoires du DNTE, MEDDE, février 2014,*
http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf

Les parts modales des scénarios EFF et SOB sont en rupture majeure (42 % de fret ferroviaire dans le scénario SOB notamment), la part modale des VP autour de 67 % dans le scénario EFF serait également une rupture majeure par rapport à des parts modales qui évoluent très lentement.

3.4.3. Le projet DDPP – septembre 2015 :

Dans le sillage des travaux du DNTE, les travaux du **DDPP** (deep decarbonization pathway project)⁷⁴ s'attachent à quantifier les effets temporels de mesures diverses dans les scénarios d'émissions. Le travail est fait à l'échelle mondiale, et propose sur la base des scénarios précités du DNTE une déclinaison pour la France⁷⁵.

3.4.3.1. Étude internationale



Évolution sectorielles internationales des émissions par rapport à 2010 -

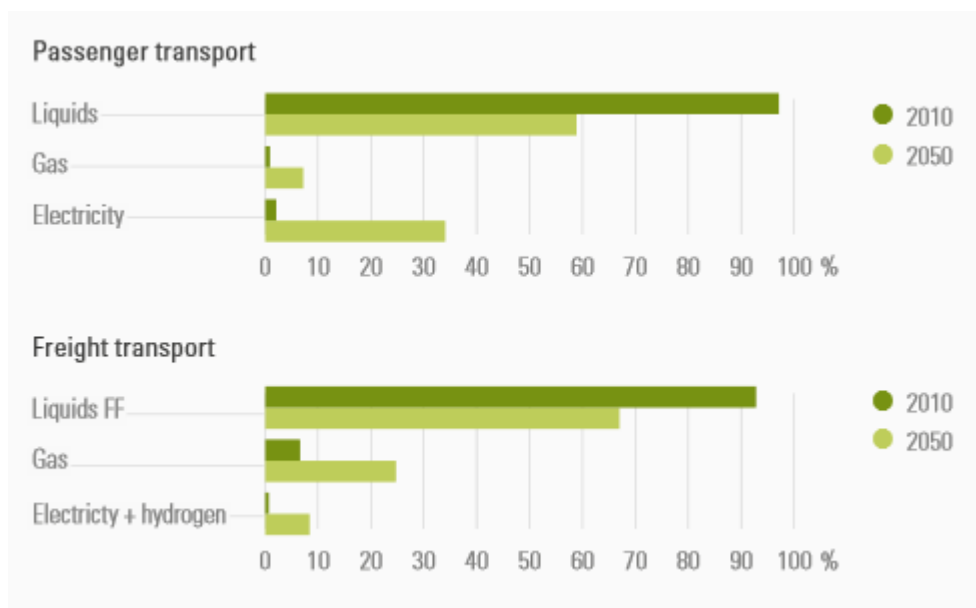
Source : <http://deepdecarbonization.org/>

Dans un panel de 16 pays, l'étude conclut en moyenne à une possibilité de diviser depuis 2010 à l'horizon 2050 par 3 dans le secteur des transports de voyageurs et de diminuer de 20 % seulement en transport de marchandises. Si on compare à 1990, on arrive en gros à 60 % de réduction des GES en voyageurs et 5 % de hausse en marchandises.

Le graphique suivant montre la part des différentes sources d'énergie dans les transports dans ce panel. On aboutit à un tiers d'électricité dans les transports de voyageurs. Pour les transports de marchandises, un mix avec un quart de gaz et moins de 10 % d'électricité et d'hydrogène.

⁷⁴ <http://deepdecarbonization.org/countries/#france>

⁷⁵ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf



Évolutions internationales des émissions du transport de voyageurs et de marchandises entre 2010 et 2050 - Source : <http://deepdecarbonization.org/>

L'étude examine différents types de pays. Pour des pays de moyenne intensité d'émissions mais à hauts revenus, comme la plupart des pays européens dont la France, le volet transports des scénarios passent par une électrification du transport de voyageurs de la vie quotidienne, et une action sur la modération de la demande de transport, notamment routière.

Dans ces pays, la réduction forte des émissions de GES transports est compatible avec grosso modo une stagnation de la mobilité des voyageurs, voire une légère décroissance. Dans des pays en développement, la mobilité voyageurs pourrait s'accroître encore fortement pourvu que l'intensité énergétique baisse, notamment grâce à l'adoption des nouvelles technologies de motorisation.

Dans ce secteur, l'étude montre que la décarbonisation est compatible avec une forte amélioration de la pollution locale de l'air.

Figure 17. Passenger mobility

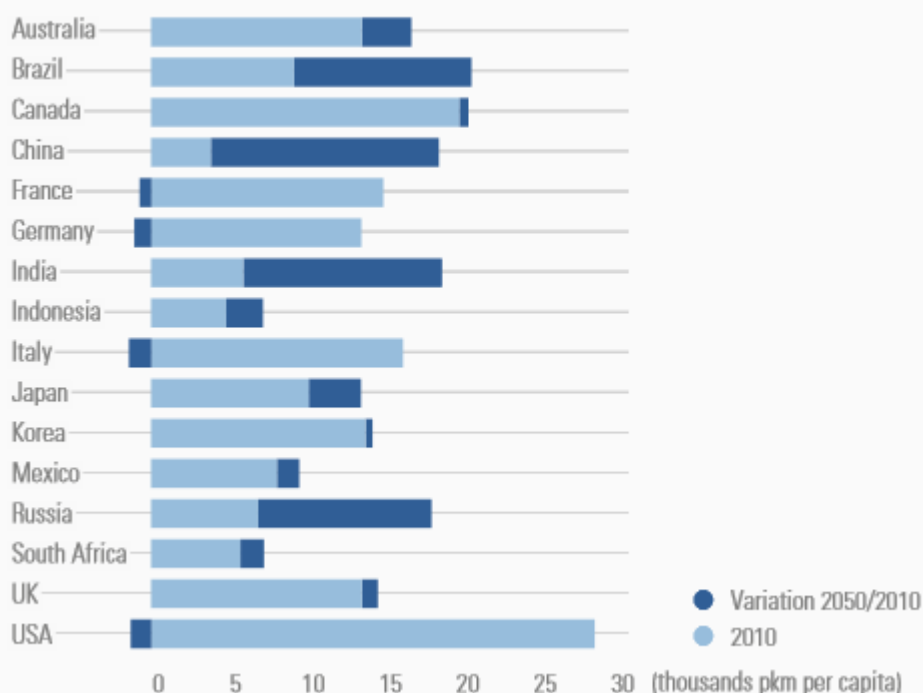
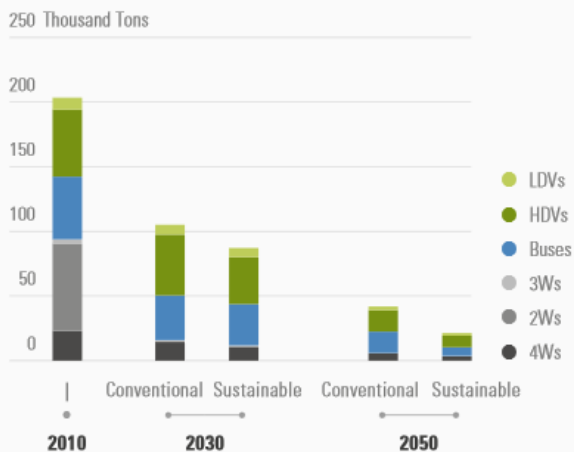
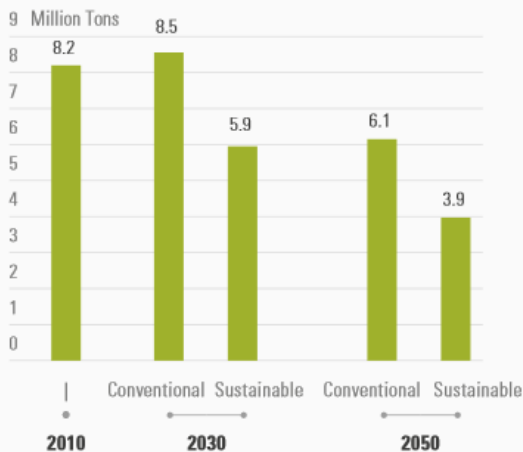


Figure 21. India. Air quality, PM2.5 and SO₂ Emissions

PM2.5 Emissions from Road Transport



SO₂ Emissions



Source : <http://deepdecarbonization.org/>

L'étude en conclut que la décarbonisation profonde est compatible avec le maintien des niveaux de vie dans le monde développé et sa croissance dans le monde en développement.

Les comparaisons internationales semblent indiquer que, du point de vue la mobilité, le cas français semble proche des pays de l'Europe de l'Ouest.

Elle indique que son coût resterait raisonnable. Le tableau ci-dessous indique un investissement de 1,3 % du PIB en moyenne en fin de période, dont le tiers en début

de période et la moitié en fin de période pour les véhicules à bas carbone, soit environ 0,6 % du PIB ; ce qui correspondrait à 5 milliards d'euros par an en 2020 et 17 milliards d'euros par an en France en 2050.

Table 5. Annual investment in key low carbon technologies and their share of GDP for DDPP countries.

		2020	2030	2040	2050
Annual investments in the 16 DDPP scenarios (B\$)	Low-carbon power generation	270	514	701	844
	Low-carbon fuel production	57	117	124	127
	Low-carbon transport vehicles (passenger+freight)	157	333	626	911
	Total (Billion US \$)	484	963	1452	1882
Annual investments in low-carbon technologies as a share of GDP (%)		0,8%	1,2%	1,3%	1,3%

Source : <http://deepdecarbonization.org/>

On retrouve l'ordre de grandeur des dépenses prévues par an dans les transports dans le cadre du scénario AMS2 de 4 à 6 milliards d'euros en moyenne d'ici 2035, mais qui n'intègrent probablement pas les dépenses privées, ou en partie seulement.

Le rapport propose deux annexes sur la mobilité, appuyées sur le cas britannique, mais qui sont intéressantes dans l'analyse des potentiels de réduction des émissions de GES transports dans un pays d'Europe occidentale. Le cas français n'est pas aussi détaillé pour les transports.

Dans une annexe britannique sur le transport routier de marchandises, l'étude propose trois scénarios pour ce secteur concernant sa motorisation.

Dans tous les cas, l'hydrogène devient nettement majoritaire en 2050. Le gazole se réduit, et le GNV (CNG) sert de carburant de transition pour 20 à 30 % environ aux étapes intermédiaires, et même en 2050 en R-DEM. L'électrique n'apparaît pas sauf un peu en 2050 en D-EXP.

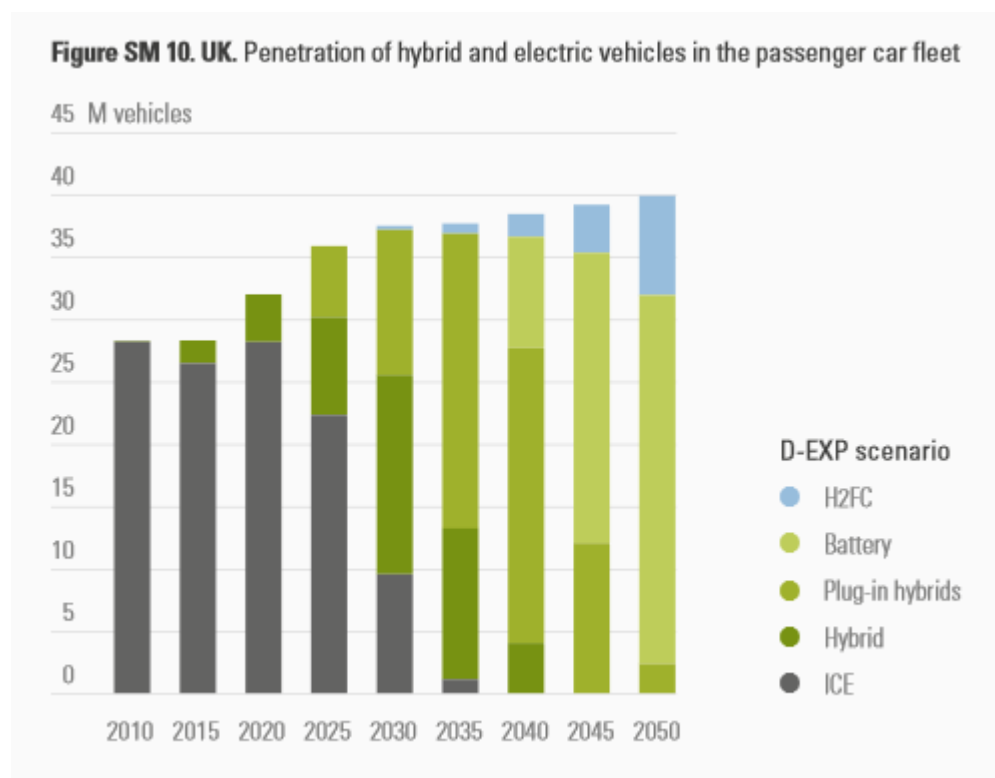
Figure SM 11. UK. Shares of Heavy Goods Vehicles by technology under UK DDPP scenarios



Source : <http://deepdecarbonization.org/>

L'électrique est effectivement peu adapté à un usage interurbain. L'étude semble avoir confiance dans la viabilité économique de solutions à l'hydrogène, déjà non négligeables dès 2020.

Une étude de cas britannique traite également du parc VL. Elle aboutit aux évolutions suivantes du parc.



Source : <http://deepdecarbonization.org/>

On y voit une quasi disparition dans le parc des véhicules thermiques non hybrides en 2035. ce qui signifie qu'on ne les commercialiserait presque plus au moins dix ans avant, soit 2025, voire une chute dès 2020 dans les ventes.

Le scénario prévoit une quasi-extinction des hybrides non rechargeables en 2040, donc une fin de vente vers 2030 voire déjà vers 2025.

Cela aboutit à une quasi interdiction des véhicules thermiques non hybrides en 2025 et des hybrides non rechargeables en 2030.

Les véhicules hybrides VHR deviennent majoritaires dans le parc vers 2040 et les électriques VE deviennent majoritaires vers 2045. Ce qui suppose une majorité de VHR dans le neuf en 2030 et de VE en 2035.

L'hydrogène sur la base de la pile à combustible se développe ensuite, mais reste encore nettement minoritaire en 2050 dans les VL.

L'étude pointe cependant des facteurs de risque, sur la baisse des prix des véhicules hybrides, hybrides rechargeables et électriques. Il convient aussi que les consommateurs ne présentent pas d'inquiétudes face aux autonomies des batteries,

aux durées de charge, et à leur « awareness and acceptance ». (conscientisation et acceptation).

Ceci est donc très proche du scénario développé dans la présente annexe, concernant l'interdiction des véhicules thermiques (ICE) vers 2025, hybrides non rechargeables vers 2030.

Pour l'hydrogène, vers la fin de période, l'étude voit un potentiel important pour les PL mais pas pour les VL. Le caractère plus local des circulations VL, donc plus électrifiable doit être une explication de cette différence.

Sur l'hydrogène en pile à combustible, cette étude lui donne un rôle, mais plutôt à long terme. Pour les PL elle mentionne H2, et les VL H2FC, ce qui suppose que l'hydrogène pourrait pour les PL être davantage incorporé dans un mix gazier. Également, la capacité de stockage de l'hydrogène est plus importante dans un PL que dans un VL, et donc cela implique un réseau de distribution nettement moins maillé, ce qui serait cohérent avec un réseau de distribution onéreux pendant assez longtemps.

3.4.3.2. Cas de la France

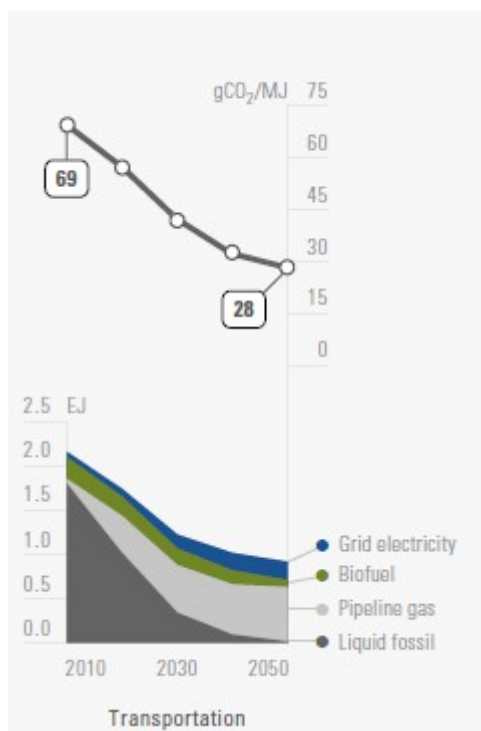
Dans la déclinaison des travaux du DDPP pour la France⁷⁶ sur la base des scénarios précités du DNTE une déclinaison pour la France⁷⁷, est fait incidemment le constat d'une certaine similitude entre les orientations de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte en date du 7 août 2015 (LTECV) et le scénario de type EFF⁷⁸, en raison de l'objectif de division par deux de la demande énergétique finale en 2050 par rapport à 2012 (LTECV) ou 2010 (trajectoire EFF).

Dans le secteur des transports, le DDPP rappelle les hypothèses du scénario EFF de changements de technologie et de comportements. La consommation de transport doit croître modérément jusqu'en 2030 puis se réduire de 20 % jusqu'en 2050 (réorganisation des transports urbains, transports publics...). Les changements technologiques sont tels qu'en 2050 ne subsistent plus que les véhicules électriques, hybrides et au gaz. La trajectoire énergétique et d'intensité carbone pour les transports est alors, pour le scénario d'efficacité (EFF):

⁷⁶ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

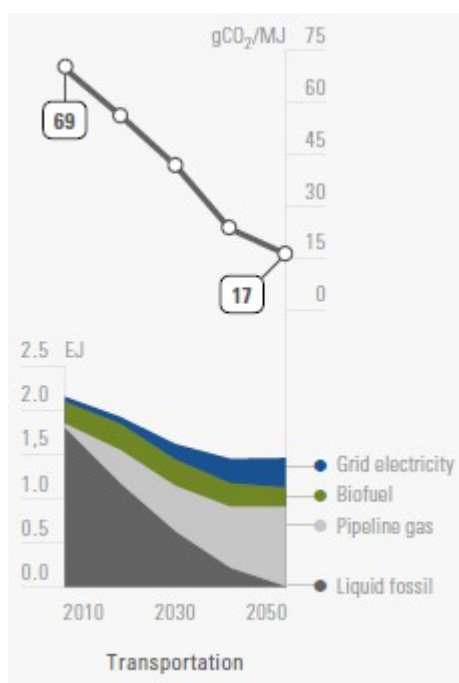
⁷⁷ http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

⁷⁸ « La trajectoire EFF, inspirée des scénarios ADEME, GRDF, ANCRE Sob et Encilowcarb renforcé, prévoit une baisse de la demande énergétique importante et une diversification du mix énergétique. A horizon 2030, la trajectoire EFF vise à tirer, de manière ambitieuse mais réaliste, le potentiel maximum des économies d'énergie et des énergies renouvelables. », selon le document « Étude des 4 trajectoires du DNTE », http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/tude_Trajectoires_DNTE_cle74f7d5.pdf



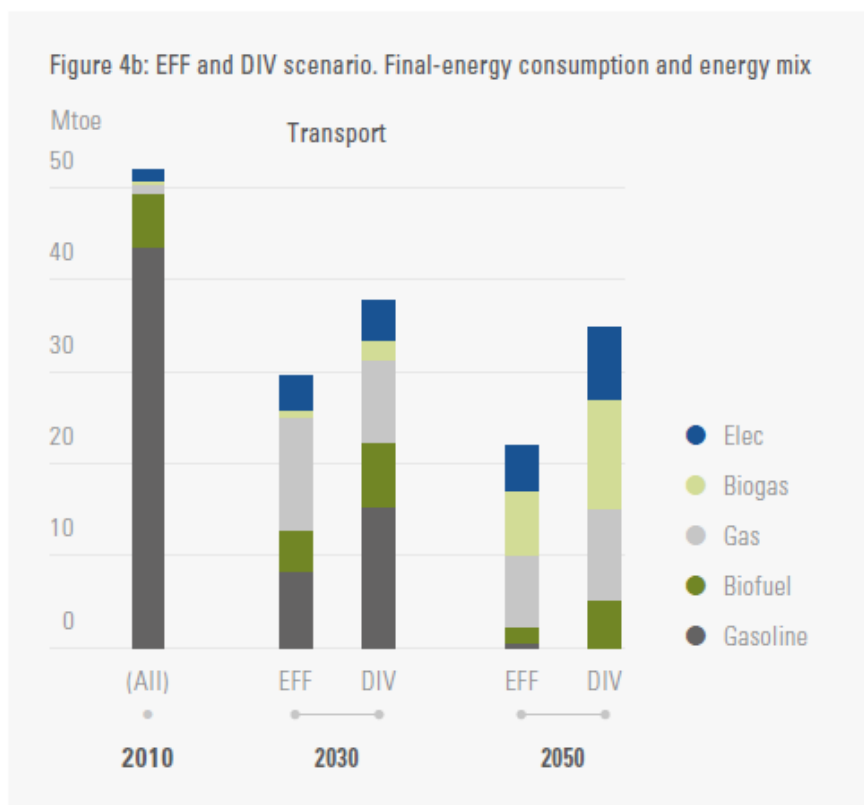
Source : http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

Le scénario DIV, moins drastique en termes de demande (qui pour les transports par exemple envisage +55 % de demande en tonnes-kilomètres par rapport à 2010) mais compensé par une plus grande décarbonation des énergies (par exemple un plus grand recours aux biocarburants), est aussi analysé. La trajectoire énergétique et d'intensité carbone pour les transports dans le scénario de diversité (DIV) est :



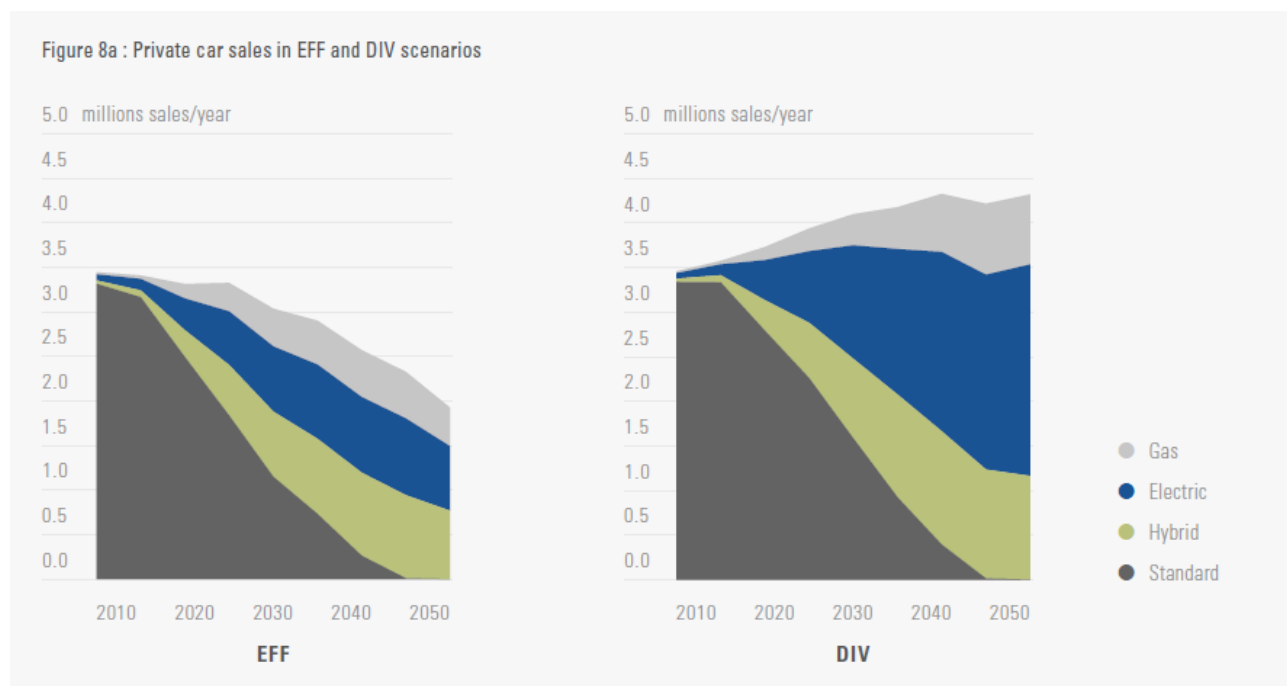
Source: http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

Le rapport compare aussi les deux scénarios EFF et DIV, par exemple en termes de carburant :



Source: http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

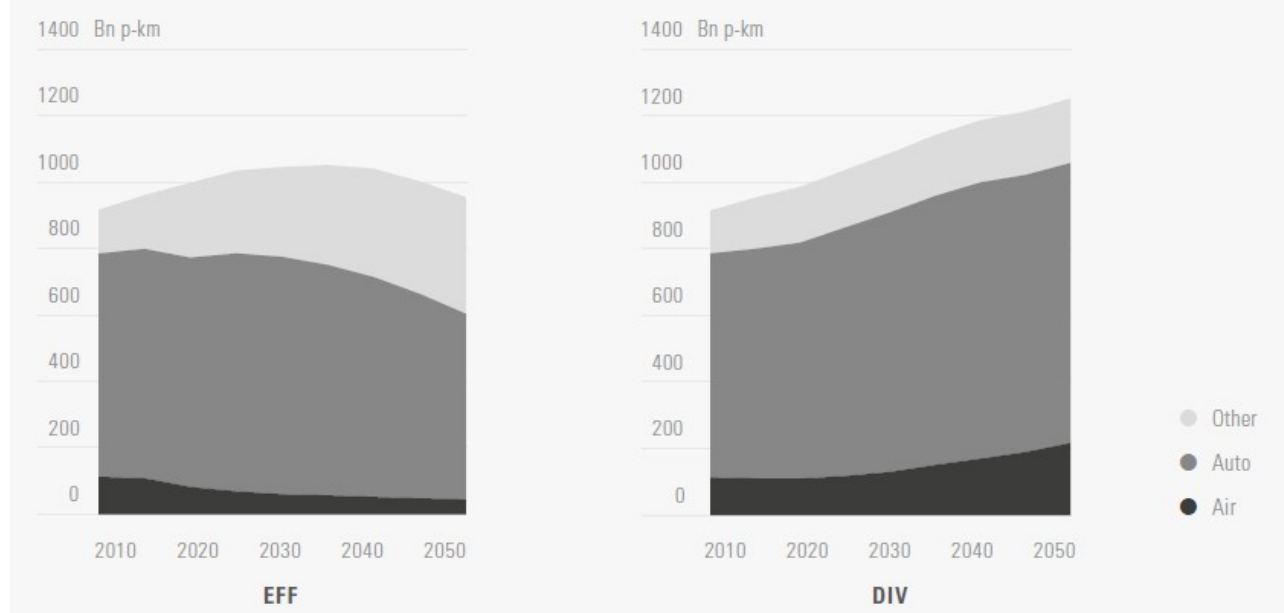
de vente de VL :



Source: http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

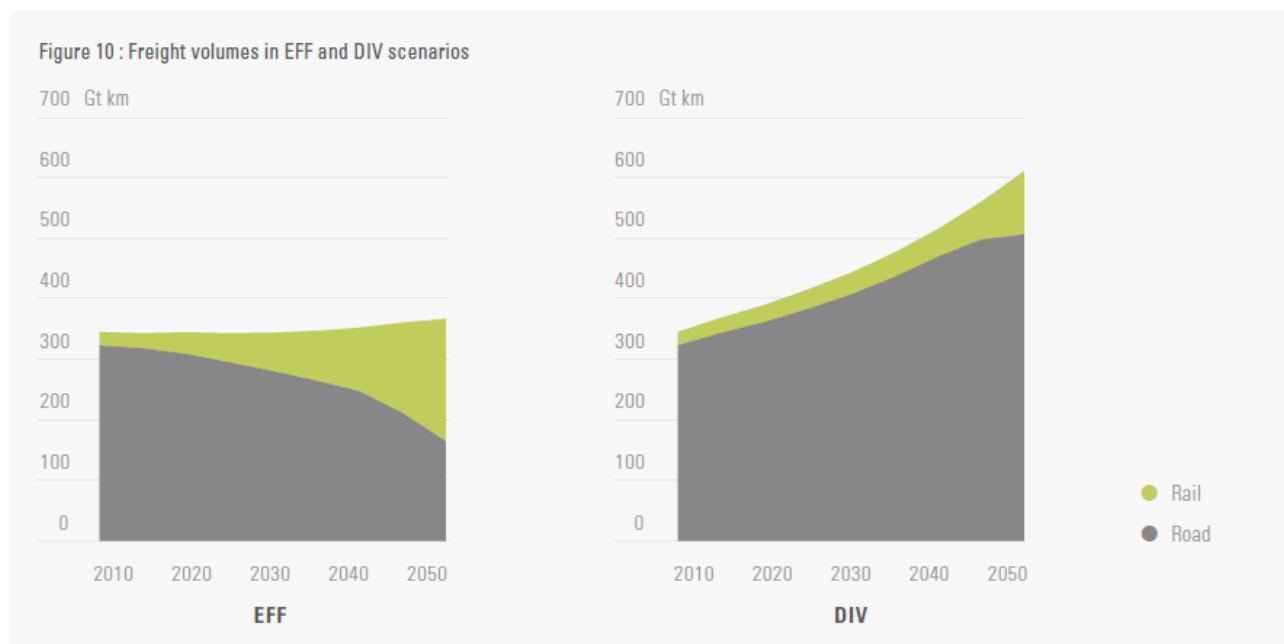
de mode de transport passager :

Figure 8b : Modal distribution for passenger mobility in EFF and DIV scenarios



Source: http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

de volume de fret :



Source: http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_FRA.pdf

3.4.4. L'étude de l'ADEME sur un mix 100 % énergies renouvelables en 2050 – octobre 2015 :

L'étude examine, dans ce travail à vocation scientifique, prospective, exploratoire⁷⁹, si un mix électrique 100 % renouvelable est possible et à un coût raisonnable en 2050, et conclut entre autres, dans un cas de référence sans trop de contraintes, que le coût de l'énergie dans un mix électrique 100 % renouvelable (119€/MWh) ne serait pas significativement supérieur au coût de l'énergie dans un mix renouvelable à 40 % (117 €/MWh), les coûts supplémentaires de la production renouvelable et du stockage nécessaire étant compensés par les coûts de la production thermique évitée.⁸⁰

Ce mix permet de passer un hiver froid ou une semaine où le vent tombe.

Si on regarde les implications de cette étude pour les transports, on voit par exemple que l'ADEME prend en compte la présence de 2/3 du parc VL en véhicules électriques VE ou en véhicules hybrides rechargeables en 2050, ce qui semble raisonnable. On pourrait même imaginer davantage, notamment de VHR.

L'ADEME définit ensuite des hypothèses de profil de charge comme suit, en distinguant semaine et week-end :

Tableau 7 : Répartition des comportements de charge en 2050

	Part du parc la semaine	Part du parc le week-end
Recharge quand on rentre chez soi le soir	35%	0%
Recharge lors du stationnement	60%	95%
Recharge pendant les heures creuses	0%	0%
Base	5%	5%

On obtient les profils de consommation suivants pour les véhicules électriques :

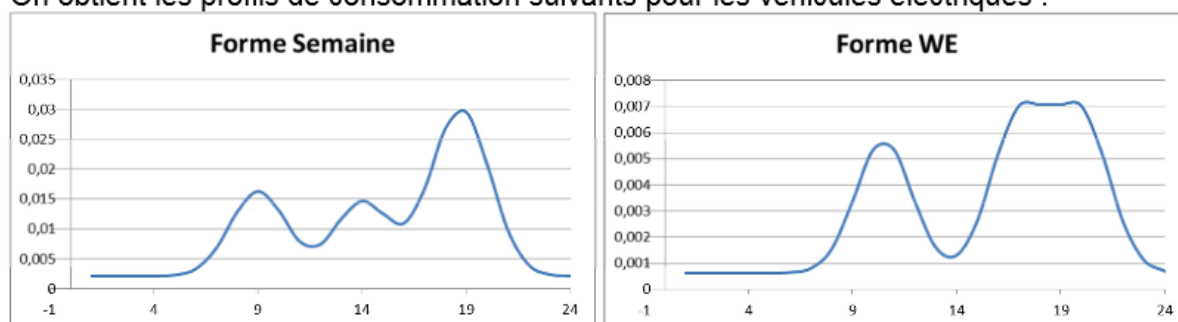


Figure 23 : Profils de consommation des véhicules électriques reconstitués par mélange gaussien

Source : « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, octobre 2015; <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

Elle compare ensuite à ceux figurant dans les travaux de RTE :

⁷⁹ « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, octobre 2015; <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations> ; http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rapport_final.pdf ; http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/annexe_consommation.pdf ; etc.

⁸⁰ <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/mix100-enre-synthese-technique-macro-economique-8892.pdf>

Les profils de consommations des véhicules électriques peuvent être comparés aux travaux réalisés par RTE dans le bilan prévisionnel édition 2011¹² :

Profil moyen pour un véhicule, jour ouvrable

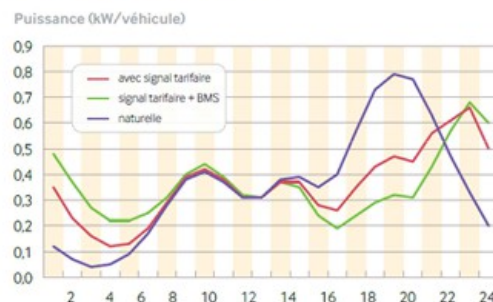


Figure 24 : Profil de consommation en semaine des véhicules électriques proposé par RTE

Source : « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, octobre 2015; <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

Cela montre que des signaux tarifaires peuvent étaler la pointe du soir de manière significative. L'ADEME indique ne pas le prendre en compte.

Après un calage sur 2013, l'ADEME effectue une projection 2050. Au niveau global, on voit qu'elle projette que la consommation d'électricité dans les transports en 2050 pourrait être à peine plus faible que celle de l'industrie, ce qui constitue un changement majeur par rapport à 2013.

L'ADEME note « l'impact significatif des VE et VHR sur la forme de la courbe de charge les jours de semaine ». En scénario de demande haute et en scénario de demande basse, les VE et VHR créent un pic de consommation les soirs d'été.

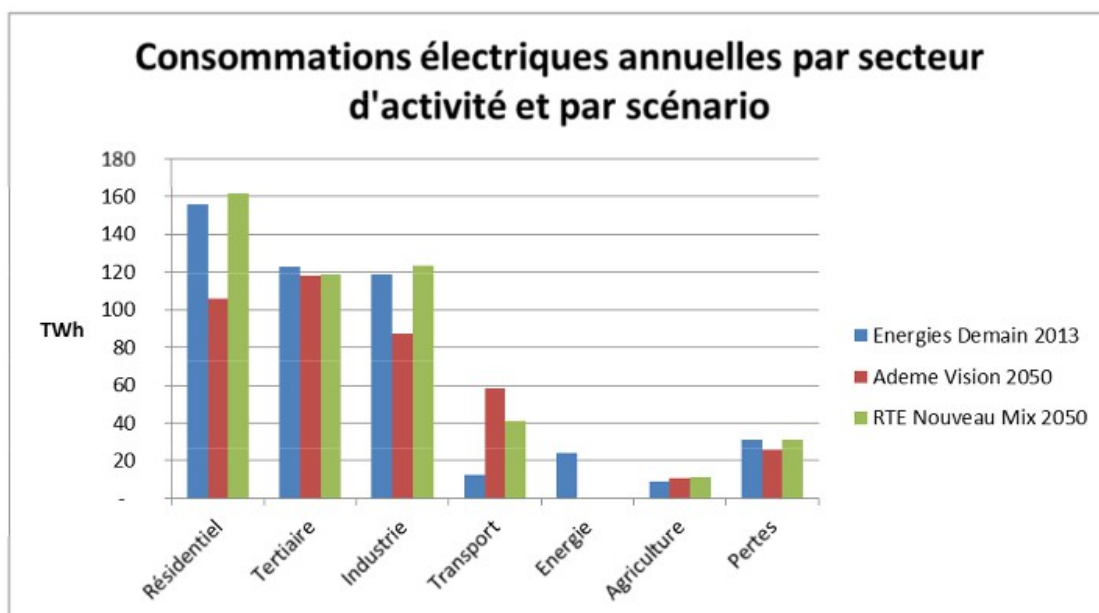
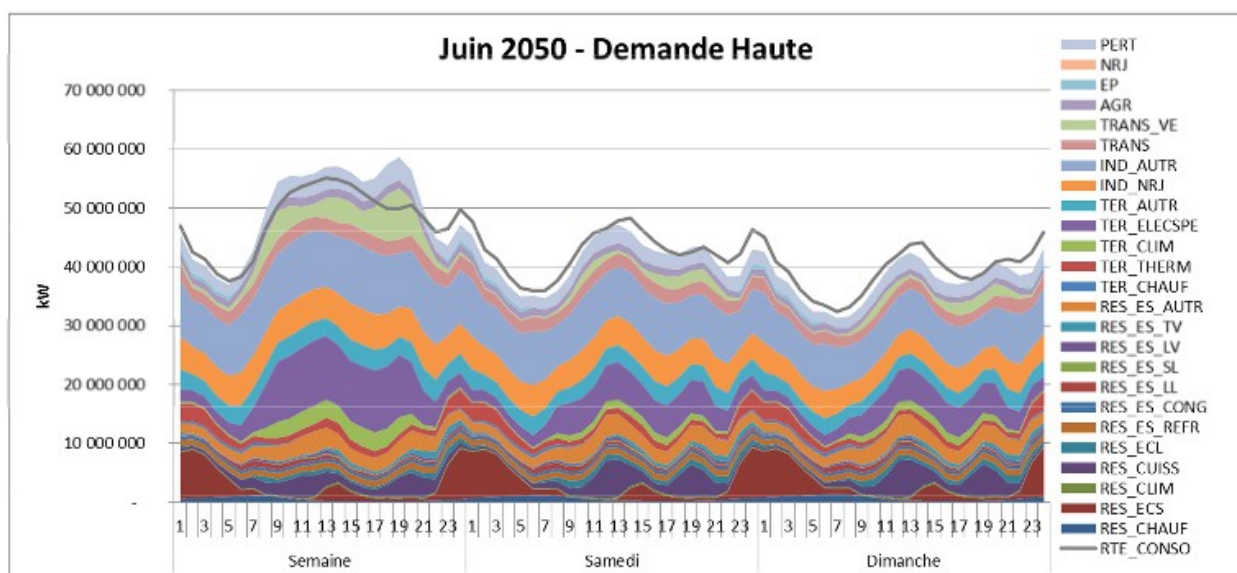


Figure 43 : Comparaison des niveaux de consommations sectorielles entre la situation actuelle et les deux scénarios de demande 2050



Source : « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, octobre 2015; <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

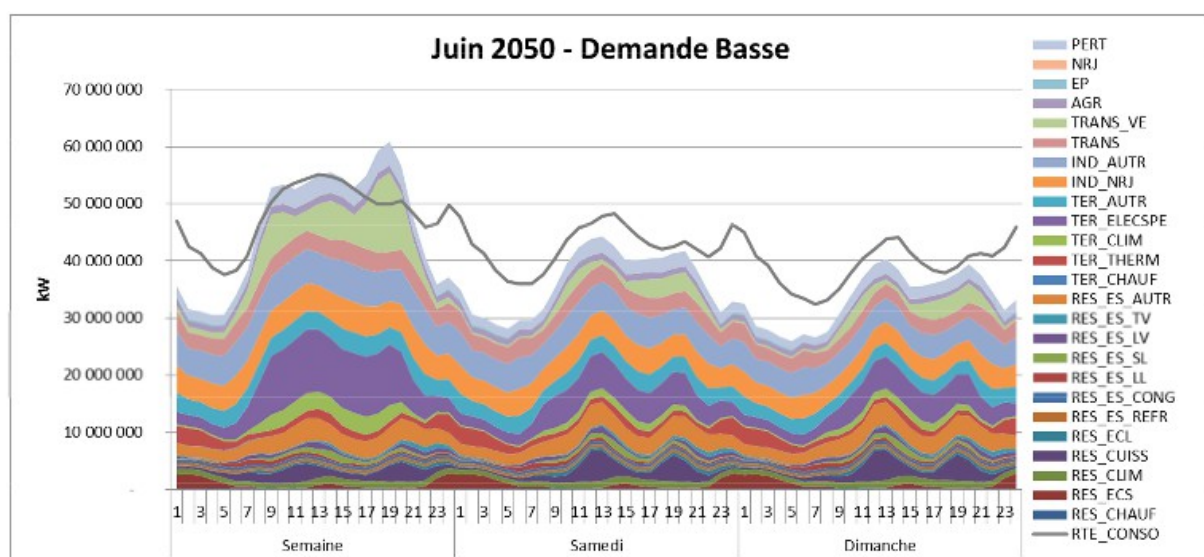
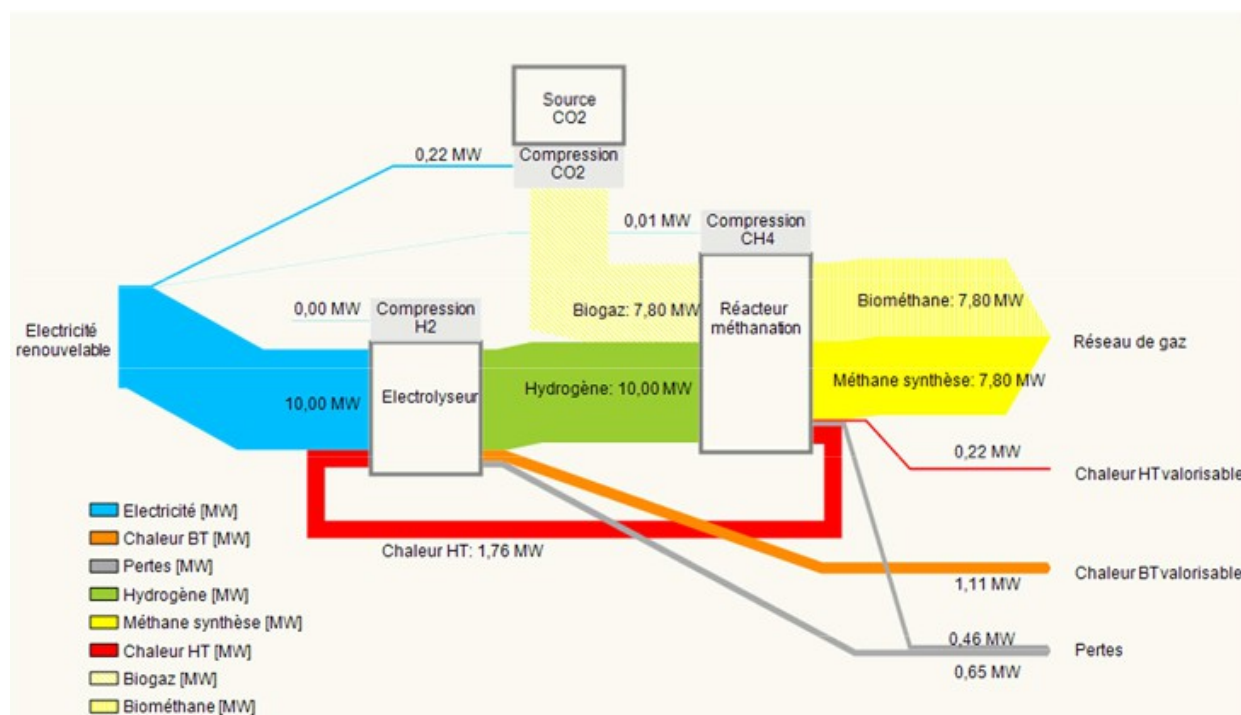


Figure 50 : Courbes de charge 2050 de la demande Basse en janvier et juin

Source : « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, octobre 2015; <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

L'étude aborde également le sujet du « power to gas ». Elle aboutit à un rendement global de 80 %, comprenant 80 % pour l'électrolyse, 80 % pour la méthanation, et récupération de la chaleur produite pour remonter le rendement global à 80 %.



Source : « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations », ADEME, octobre 2015; <http://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>

L'étude semble confirmer l'importance d'installer des prises dans les logements, et notamment aussi les copropriétés, pour éviter une pointe le soir en essayant de reporter la demande des VE et VHR vers l'extrême fin de soirée et la nuit.

Cette étude de l'ADEME constitue une avancée intéressante pour comprendre à quoi pourrait ressembler un système électrique 100 % renouvelable ou presque.

Un zoom sur le cas des DOM et TOM et collectivités d'outre-mer serait particulièrement intéressant, dans les mesures où ceux-ci ne sont pas équipés de centrales nucléaires, et ne se prêtent pas, sauf exception peut-être en Guyane, à des trajets routiers interurbains longs.

3.4.5. Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique, rapport 2013 – janvier 2014⁸¹ et le rapport ANCRE sur les « decarbonization wedges » - novembre 2015

L'ANCRE (alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie) propose un scénario sur les « coins de décarbonation (decarbonization wedges ou DW, qui représentent graphiquement les gains au cours du temps associés à diverses mesures empilées)⁸², scénario qu'elle compare au scénario DDPP vu précédemment, et enfin examine aussi plus précisément les apports de la technologie et les conditions socio-économiques de leurs déploiements.

⁸¹ http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.asp?private_resource=984&fn=Doc+complet+ANCRE+version+finale+15+Janv_0.pdf

⁸² http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.asp?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

Pour les transports, le bilan obtenu est celui-ci :

Table 2 - Mitigation potential scaling

	0
	not significant
	significant (i.e. more than 1% of global emissions reduction) in some countries
	significant on the global scale
	very significant on the global scale (i.e. up to 3% of global emissions reduction)
	major technology vs. climate change (i.e. more than 3% of global emissions reduction)

Table 7 - Mitigation potential of thermal engines, hybrid and electric vehicles and H₂ vehicles

		2020	2030	2040	2050
Thermal Engine	High efficiency gasoline engines				
	Advanced Diesel engines				
	Multi-fuels engines				
	Engines dedicated to hybrid powertrains				
Hybrid and Electric Vehicles	Transition hybrids				
	Plug-in hybrids				
	Electric vehicles				
H2 Vehicles	H ₂ vehicle				

Source: ANCRE

Potentiel d'atténuation des émissions de GES par diverses technologies des transports – source, ANCRE, http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

Elle suppose un mix de moteurs thermique, hybrides et électriques ainsi que des véhicules à hydrogène (piles à combustible). Les moteurs thermiques continueront à être utilisés vraisemblablement en interurbain marchandises et pour des trajets à longue distance (ou des hybrides rechargeables) pendant l'essentiel de la période.

L'étude considère la rentabilité économique comme un verrou dans tous les secteurs et pour toutes les technologies. Par exemple elle pointe les difficultés économiques de la solution hydrogène (électrolyse, stockage pour la mobilité, PEMFC -pile à combustible à membrane échange de protons-, ainsi que le stockage et la distribution). Elle ne voit pour cette technologie, à la différence de l'électrique, qu'un impact de moins de 3 % en 2050. Toutefois, il y aura des véhicules à hydrogènes avant 2030, notamment en Allemagne, et il y a un potentiel de long terme qui peut-être important.

Table 11– Identifying the major bottlenecks

	R&D	Economy	Regulation	Resource & envir.	Safety & security	Socio-tech. feasibility
Building						
Industry						
Transport						
Biomass						
Hydro energy						
Geothermal						
Marine						
Nuclear (Gen3/3+ & cogen)						
Solar						
Wind						
CCS						
Power to Gas and H2						
Networks/grids						
Storage						

Source: ANCRE

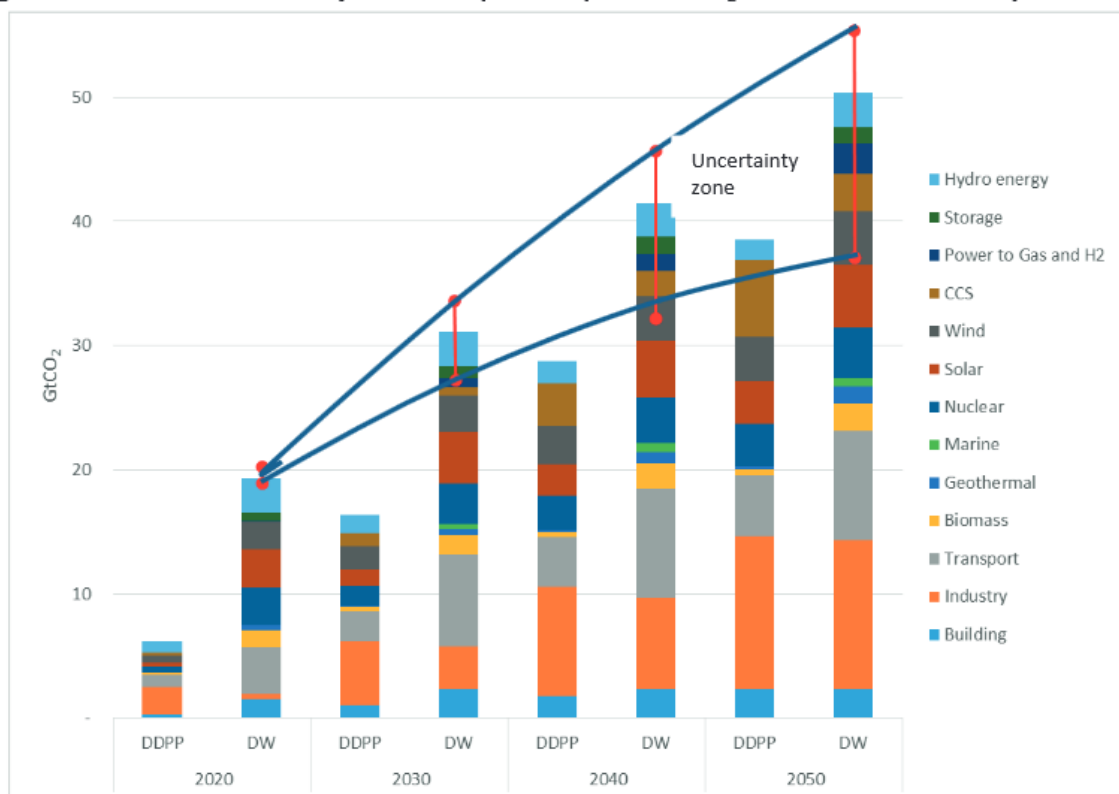
Note: this table lists technologies according to the three most significant bottlenecks; in dark blue= major bottlenecks (ranks 1 & 2), blue = important bottleneck (rank 3)

Verrous majeurs pour les secteurs et les technologies susceptibles de réduire les émissions - Source : ANCRE,

http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

L'étude compare les objectifs du DDPP avec les potentiels d'atténuation tels qu'estimés par son groupe de travail sur les DW. Pour les transports, on voit que DW est nettement plus optimiste que DDPP, mais comporte de nombreuses incertitudes. Les causes de ces différences mériteraient des investigations complémentaires.

Figure 11 – DDPP abatement objectives compared to potential CO₂ abatement estimated by ANCRE-WGs



Source: DDPP & ANCRE

Objectifs d'atténuation DDPP et potentiels d'atténuation estimés par DW –
Source, Decarbonization wedge report, nov. 2015, p. 24,
http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=Decarbonization_Wedges_report_0.pdf

Une appréciation assez proche de celle du présent document, plaçant l'hydrogène plutôt dans des solutions de long terme du fait du coût du système. Si l'hydrogène se révélait une solution économiquement viable dans certains cas (véhicules pouvant emporter de grandes quantités, comme les trains, les bateaux, à un moindre degré les poids lourds, ou bien véhicules toujours proches d'une seule pompe (exemple véhicules serviciels urbains locaux), cela ne peut qu'améliorer la performance du scénario.

La différence entre les dates de migrations vers le véhicule hybride rechargeable, le véhicule électrique montre l'importance des facteurs d'accompagnement, notamment celui de l'accès à la prise électrique facilité dans tous les cas.

3.4.6. La Loi de transition énergétique pour la croissance verte, août 2015

La LTECV⁸³ (loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte) a entre autres pour objectifs, dans le domaine des transports propres, de réduire la dépendance aux hydrocarbures (metteurs de GES), de promouvoir les véhicules à faibles émissions, d'atteindre 10 % d'énergie renouvelable

⁸³ http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/joe_20150818_0189_0001_1_-3.pdf

dans les transports en 2020, et de déployer sept millions de points de recharge pour le véhicule électrique d'ici 2030 (il y en avait 10 000 mi 2015).

Les mesures en faveur des particuliers incluent la contribution employeur aux frais de déplacement en vélo, la prime à la conversion d'un véhicule polluant vers un véhicule électrique (jusqu'à 10 000 €), l'aide à l'installation de bornes de recharge de septembre 2014 à fin 2015 (crédit d'impôt de 30%).

L'État s'engage à avoir plus d'un véhicule sur deux à faible émissions de CO₂, les collectivités s'engagent à hauteur de 20 % (et en 2025 tous les bus et autocars acquis devront être à faible émission). Des outils de concertation, planification rurale seront développés. Des mesures de restriction de la circulation peuvent être mises en œuvre. Le fonds d'épargne de la Caisse des dépôts et consignations, noté de 5 G€, finance les projets contribuant à la transition énergétique depuis le 1^{er} août 2014.

Pour les entreprises, la grande distribution doit réduire ses émissions de GES liées au transport et à la logistique de 10 % d'ici 2020 et 20 % d'ici 2025. Les loueurs de voitures et taxis doivent acquérir 10 % de véhicules à faibles émissions lors du renouvellement de flotte.

En ce qui concerne les transports, les principales dispositions de la loi de transition énergétique pour le croissance verte sont les suivantes :

Développement de transports propres pour améliorer la qualité de l'air grâce à la recherche de l'efficacité énergétique et l'usage des énergies renouvelables

Pour le transport des personnes, l'État encourage le report modal du transport routier par véhicule individuel vers le transport ferroviaire, les transports collectifs routiers et les transports non motorisés. (Art 36 LTECV)

Parc automobile

Lors du renouvellement des flottes automobiles de plus de vingt véhicules automobiles, l'achat de véhicules à **faibles émissions** (véhicules électriques ou à faibles émissions de CO₂ et de polluants de l'air) se fera dans une proportion minimale :

- de 50 % pour l'État et ses établissements publics aussi bien pour les véhicules dont le poids total autorisé en charge est inférieur à 3,5 tonnes ou est supérieur à 3,5 tonnes ;
- de 20 % pour les collectivités territoriales pour les parcs dont le poids total autorisé en charge est inférieur à 3,5 tonnes.

Les véhicules utilisés par la défense nationale, la police, la gendarmerie et la sécurité civile pourront contribuer à la poursuite de cet objectif.

Parc autobus et autocars

Lors du renouvellement des parcs de plus de vingt autobus et autocars :

- L'Etat, ses établissements publics, les collectivités territoriales et leurs groupements, le STIF, la métropole de Lyon acquièrent des véhicules à faibles émissions dont la proportion minimale :

- de 50 % du renouvellement à partir du 1^{er} janvier 2020 ;

- en totalité à partir du 1^{er} janvier 2025.

- La Régie autonome des transports parisiens (RATP) acquiert des véhicules à faibles émissions dans une proportion de 50 % à partir du 1^{er} janvier 2018.

Points de charge pour véhicules électriques ou hybrides

- Sept millions de points de charge pour les véhicules électriques et hybrides seront installés sur le territoire national d'ici à 2030 ;
- Obligation de doter tout nouveau bâtiment accueillant un service public équipé de places de stationnement, de gaines techniques, câblages et dispositifs de sécurité nécessaires à l'alimentation d'une prise de recharge pour véhicules électrique ou hybrides rechargeable ; (art. 41 III LTECV)
- même obligation lors de travaux sur un parc de stationnement annexe à un bâtiment accueillant un service public équipé places de stationnement
- l'installation de points de charge dans les bâtiments tertiaires et dans les bâtiments d'habitation et en accompagnant les initiatives privées sera encouragée par les collectivités territoriales.

Développement et diffusion du vélo

- Obligation de doter tout nouveau bâtiment accueillant un service public équipé places de stationnement, d'infrastructures permettant le stationnement des vélos ;
- même obligation lors de travaux sur un parc de stationnement annexe à un bâtiment accueillant un service public équipé places de stationnement
- développement massif des voies de circulation et de places de stationnement réservées aux véhicules non motorisés ;
- prise en charge par l'employeur privé de tout ou partie des frais engagés par ses salariés à vélo, ou vélo à assistance électrique. (art. 50 LTECV)

Covoiturage

Les collectivités territoriales facilitent autant que possible les solutions de covoiturage pour les déplacements domicile-travail de leurs agents.

La loi LTECV est un ensemble de mesures et non un scénario dont le résultat découle d'une analyse des mesures. Elle introduit les mesures retenues dans la SNBC.

3.4.7. La stratégie nationale bas carbone

La Stratégie nationale bas carbone de novembre 2015⁸⁴ décline les orientations de la LTECV. Dans le secteur des transports, à partir du réalisé de 121 Mt CO₂ éq en 1990 et 136 Mt CO₂ éq en 2013, elle propose des budgets carbone annuels de 127 Mt CO₂ éq annuels sur la première période 2015-2018, 110 Mt CO₂ éq annuels sur la seconde période 2019-2023, et 96 Mt CO₂ éq annuels sur la troisième période 2024-2028. Les recommandations sectorielles pour « Des transports bas-carbone » partent du constat que « Les transports constituent le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre (27% des émissions de GES en 2013). Par rapport à 2013, l'objectif dans le scénario de référence est de parvenir à baisser ses émissions de 29% à l'horizon du troisième budget carbone et d'au moins 70% d'ici 2050. ». Les « Objectifs stratégiques et actions immédiates » suivent : « Pour atteindre ces objectifs ambitieux, les politiques mises en place devront tout particulièrement permettre d'accélérer :

1. l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules (viser les 2l au 100 km en moyenne pour les véhicules vendus en 2030) ;

2. la transition vers des vecteurs énergétiques moins carbonés. Il convient notamment d'anticiper les délais de développement des infrastructures de ravitaillement (bornes de recharge électriques, unités de livraison de gaz) indispensables à la transition vers des transports bas-carbone et coordonner leur déploiement par l'ensemble des acteurs concernés (État, Collectivités, établissements publics, entreprises, ménages).

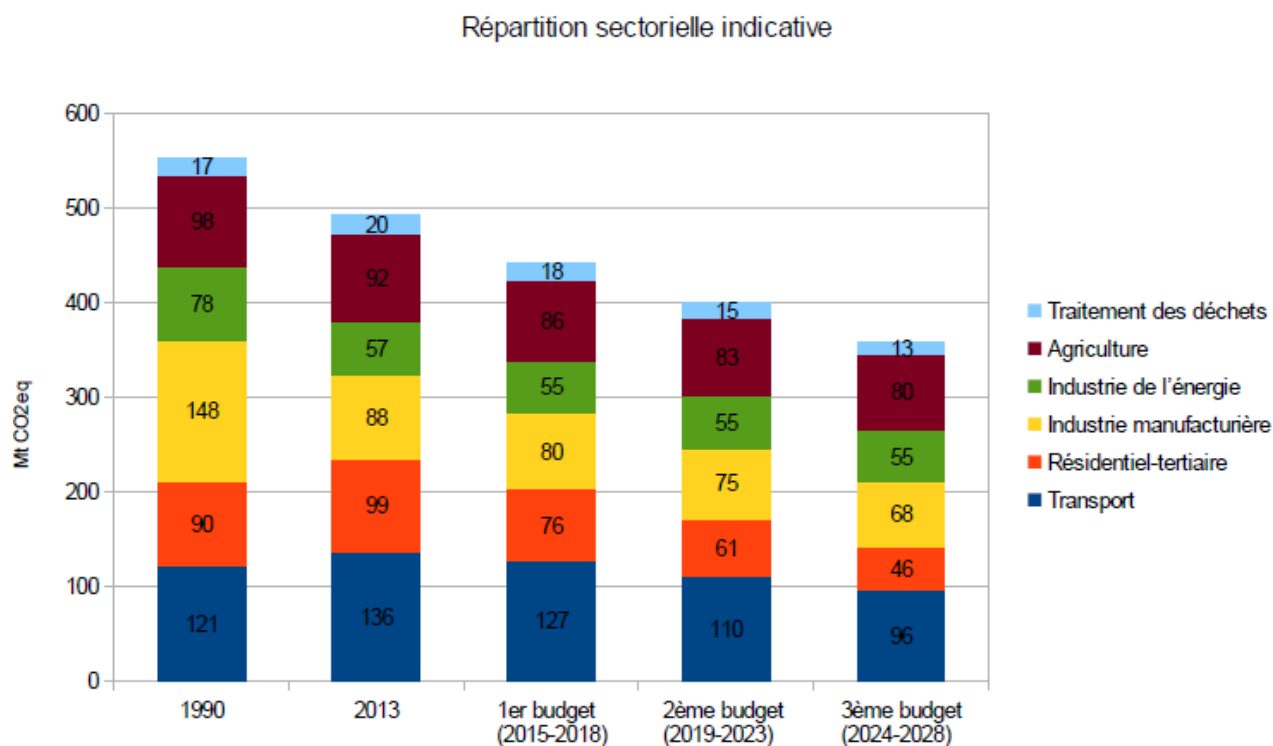
D'autres leviers devront également être mobilisés:

3. la maîtrise de la demande de mobilité (grâce au télétravail, à l'aménagement du territoire...) ;

4. l'amélioration des taux de chargement des véhicules (covoiturage) et plus généralement la meilleure utilisation des véhicules et réseaux existants (article 44 de la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte) ;

5. le report modal des personnes et des marchandises vers les modes de transports non routiers et non aériens (comme le ferroviaire, les modes actifs (le vélo et la marche), etc..) qui doit être favorisé dans les choix d'aménagement du territoire et d'investissements dans les infrastructures de transport. ».

⁸⁴ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html>
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf



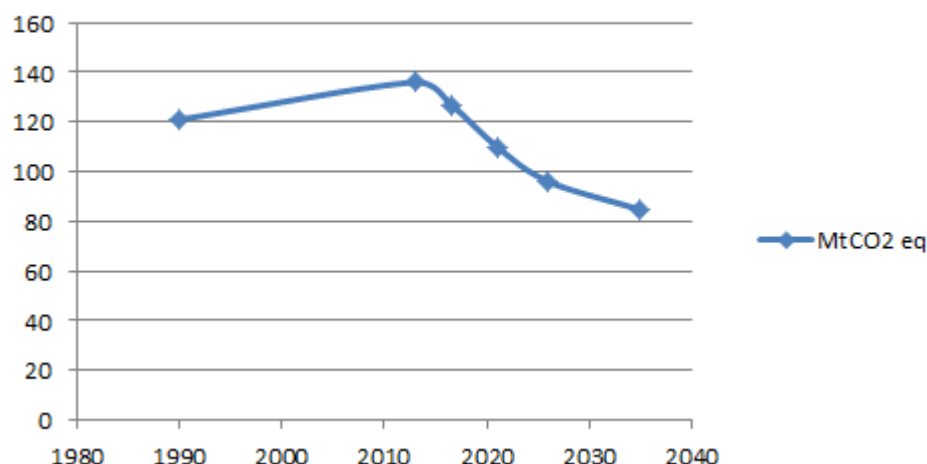
Répartition sectorielle indicative des budgets carbone – Source, SNBC,
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html> , http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf

Les évolutions en % des émissions de GES du secteur des transports sont donc les suivantes :

	SNBC				
MtCO ₂ eq	1990				
	121				
vs 1990					
vs 2013					

La stratégie nationale bas carbone s'appuie sur le scénario AMS2 (avec mesures supplémentaires) des scénarios prospectifs énergie climat air.

MtCO2 eq transports



Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035

http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

Dans le détail, on y lit des mesures assez proches, mais un peu plus complètes, par exemple la baisse de vitesse sur les réseaux routiers interurbains.

Dans les transports :

À moyen terme (horizon 2030 - 3035), ont été pris en compte :

- un renforcement de l'efficacité des véhicules routiers (véhicules particuliers + petits véhicules utilitaires légers et les poids lourds). Pour les véhicules particuliers et petits véhicules utilitaires légers, les consommations moyennes des véhicules neufs sont supposées en 2030 de 2l/100km.
- le développement des véhicules hybrides rechargeables (de l'ordre de 2,5 millions en 2030), électriques (1,9 millions en 2030) et roulant au gaz (pour ces derniers, les parts de marché en 2030 atteignent 5 % pour les véhicules utilitaires légers, 2,5 % pour les poids lourds et 1 % pour les véhicules particuliers).
- des mesures sur le transport de marchandises : report modal (20 % du fret est non routier en 2030) et optimisation accrue (le taux de remplissage moyen passe de 7,5 tonnes à 8,7 tonnes en 2035 (soit une augmentation de 16 %) via des démarches volontaires ou les plans d'actions demandés aux chargeurs à l'art. 12 du PLTECV).

- la part des transports publics dans la mobilité courte distance est en augmentation, soutenu notamment par de nouvelles infrastructures (développement de près de 2000km de transports en sites propres en province (tramways et bus à haut niveau de service) et prise en compte du projet du Grand Paris. Des variantes ont notamment été modélisées afin de documenter l'impact d'investissements d'ampleurs variables dans ces infrastructures de transports.
- de nouveaux comportements ayant des impacts baissiers sur la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports : 10 % des jours sont télétravaillés en 2030. Le développement du covoiturage via notamment les plans de déplacement entreprises permet une augmentation du taux d'occupation des véhicules particuliers (de 1,8 à 2 personnes en moyenne par véhicule en 2030). La part des modes doux (marche et vélo) qui était en 2008 de 2,7 % (en nombre de déplacements dans les transports de courte distance) atteint 12,5 % en 2030. L'éco-conduite contribue également à la réduction de la consommation et des émissions.
- la réduction des vitesses de circulation sur les réseaux interurbains permettant une diminution de 3 % de la consommation de l'ensemble du secteur.

A plus long terme (horizon 2050), si les transports en commun voient leur part de marché nettement renforcée, spécialement pour les marchandises, le transport routier devrait rester de très loin le mode de déplacement privilégié des Français. En revanche le parc de véhicules devrait être radicalement transformé et constitué de voitures légères consommant moins de 2l/100 km, composées de matériaux recyclables et principalement biosourcés, fonctionnant à l'électricité ou des carburants eux aussi biosourcés.

Source : Source, SNBC, p. 37, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html> ,
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/SNBC_Strategie_Nationale_Bas_Carbone_France_2015.pdf - NB Lire 2035 et non 3035

On ne connaît pas les évolutions du prix du pétrole en 2017 et 2018, mais les dérapages constatés sur les émissions de GES des transports en 2015 suite à la chute des prix du pétrole n'augure pas de l'atteinte du budget GES de cette première période temporelle. De plus, en général, on estime que de nombreuses mesures mettent du temps à présenter des effets du fait de l'inertie d'un système lourd comme celui des transports.

Au vu de l'impact du prix du pétrole sur les émissions de transports, peut-être faudrait-il envisager des budgets GES indexés sur ce paramètre, et les autres paramètres exogènes significatifs, un peu de la façon dont la Chine dans son INDC fixe sa contribution aux réductions d'émissions sur son taux de croissance.

À long terme, il serait utile de vérifier que les renforcements de part de marché des transports collectifs, y compris de marchandises, présentent des ratios coûts efficacité carbone raisonnables. Les TC consomment et émettent peu, à condition de présenter des taux de remplissage corrects. Si ce n'est pas le cas, la mesure peut être à la fois s'avérer coûteuse et même contre-productive.

Sur le plan des principes, la SNBC propose de tenir compte des empreintes de la consommation de transports, des sujets liés aux conséquences de l'occupation des sols par les transports notamment, ce qui est une avancée importante.

Elle recommande aussi d'aller vers un traitement approprié des émissions du transport international aérien et maritime, dans le cadre de l'OACI et de l'OMI.

3.4.8. Les scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035, publiés en 2015

Le rapport « Scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air pour la France à l'horizon 2035 »⁸⁵ commandité par la DGEC et remis en septembre 2015 « fournit une synthèse des résultats de l'exercice de modélisation pour la construction des scénarios prospectifs Énergie – Climat – Air à l'horizon 2035. Deux scénarios principaux ont été construits et analysés : un scénario « AME » « avec mesures existantes » au 1^{er} janvier 2014, et un scénario « avec mesures supplémentaires » appelé « AMS2 » incluant la mise en œuvre effective de toutes les mesures prévues dans l'AME ainsi que celles adoptées ou annoncées après le 1^{er} janvier 2014, dont en particulier les mesures et objectifs prévus par la LTECV (-40% des émissions de GES en 2030 par rapport à 1990, 32% la part des énergies renouvelables en 2030, etc.

AMS2 sert de référence à la SNBC.

Le tableau ci-dessous récapitule les effets attendus à l'horizon 2030 dans les transports et le bâtiment en matière de consommation d'énergie finale.

Tableau 1 : Economies d'énergie dans les secteurs des transports et du bâtiment à horizon 2030 et par scénario

			Transports	Résidentiel	Tertiaire	Résidentiel + tertiaire	Total
Hist.	consommation d'énergie finale en 2010		49.4	45.4	22.4	67.8	154.9
AME	consommation d'énergie finale en 2030		52.6	39.2	22.5	61.7	154.1
	variation 2030/2010	(a)	7%	-14%	0%	-9%	-1%
AMS2	consommation d'énergie finale en 2030		40.6	30.1	18.2	48.3	121.4
	variation 2030/2010	(b)	-18%	-34%	-19%	-29%	-22%
Effort additionnel en 2030 dans l'AMS2 par rapport au tendanciel AME		(b)-(a)	25 points	20 points	19 points	20 points	21 points

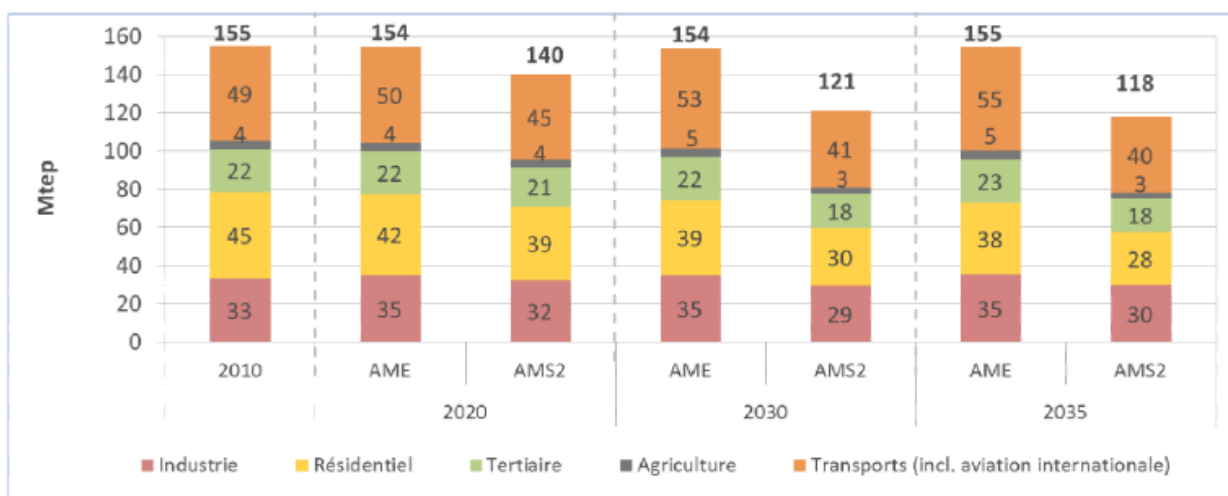
Source : Enerdata

Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

Ainsi que la demande finale d'énergie par secteur au format SOeS

⁸⁵ http://www.themavision.fr/upload/docs/application/pdf/2016-03/synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne_2016-03-17_17-50-30_662.pdf

Figure 2 : Projections de la demande finale d'énergie par secteur et par scénario (format SOeS)



Source : Enerdata

Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

On y lit que les transports passent de 49 Mtep en 2010 à 40 Mtep en 2035 en AMS2 (et 55 en AME).

AME conduit donc à une hausse de consommation d'énergie d'environ 12 % en 2035 par rapport à 2010, AMS2 à une réduction de 18 %.

Sur le plan des GES, en scénario AME, les transports (conso énergie transports), qui émettaient 121 Mt CO₂ éq en 1990, passent à 131,3 Mt CO₂ éq en 2035 soit une hausse de 7 % par rapport à 1990 mais une baisse de 2 % par rapport à 2010.

AME		Part des secteurs d'activités dans le total GES hors UTCATF - Kyoto (Mt CO ₂ e)							2030 / 1990 (%)
		1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	
CRF 1	Ind. Énergie	77,2	65,6	61,7	65,9	73,6	82,9	88,4	7%
	Conso Énergie Industrie	86,3	68,3	58,7	57,4	56,1	54,9	54,9	-36%
	Conso Énergie Transports	121,0	133,9	132,2	129,7	129,5	129,3	131,3	7%
	Conso Énergie RES/TER/AGRI	100,4	105,3	85,1	76,9	72,3	67,8	64,1	-32%
CRF 2	Procédés, gaz fluorés et solvants	63,0	43,1	41,6	41,1	38,3	37,2	37,6	-41%
CRF 3	Agriculture (hors énergie)	86,4	80,8	78,8	78,4	78,6	78,5	78,2	-9%
CRF 5	Déchets	17,3	21,3	19,5	18,1	16,8	16,2	15,6	-6%

Source : Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

En scénario AMS2, les émissions des transports passent à 79,1 Mt CO₂ éq, soit une baisse de 30 % par rapport à 1990 et de 41 % par rapport à 2010.

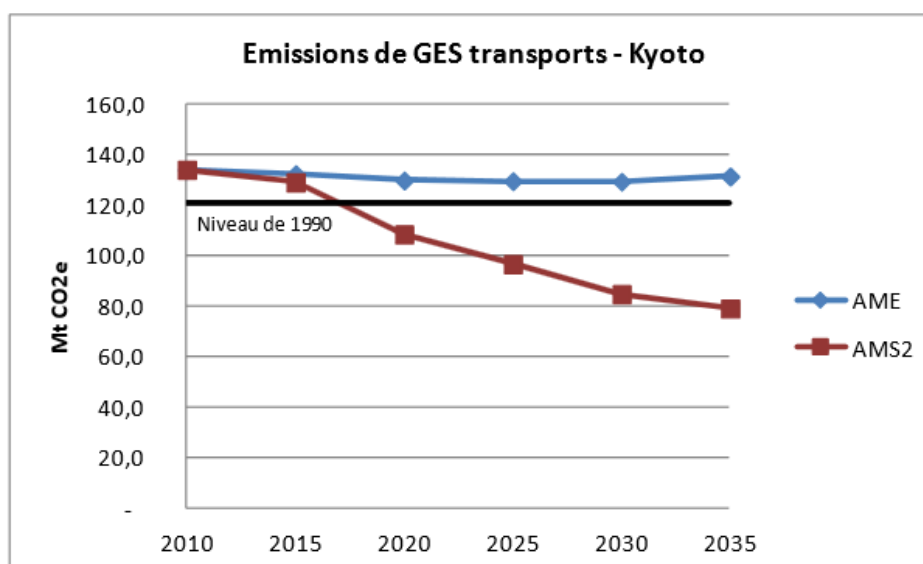
AMS2		Part des secteurs d'activités dans le total GES hors UTCATF - Kyoto (Mt CO2e)							
		1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030 / 1990 (%)
	Ind. Énergie	77,2	65,6	54,4	54,4	54,4	44,0	33,0	-43%
CRF 1	Conso Énergie Industrie	86,3	68,3	56,5	51,2	45,6	39,4	36,8	-54%
	Conso Énergie Transports	121,0	133,9	129,0	108,5	96,7	84,9	79,1	-30%
	Conso Énergie RES/TER/AGRI	100,4	105,3	80,2	62,3	50,3	37,6	30,9	-63%
CRF 2	Procédés, gaz fluorés et solvants	63,0	43,1	41,2	39,6	32,4	28,5	27,3	-55%
CRF 3	Agriculture (hors énergie)	86,4	80,8	77,4	75,3	73,4	70,8	68,4	-18%
CRF 5	Déchets	17,3	21,3	18,4	15,9	13,5	11,6	10,1	-33%

Source : CITEPA

Source : Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

Seules les émissions des trafics domestiques sont considérées dans les transports aériens et maritimes. Le graphique ci-dessous reprend les évolutions transports par pas de 5 ans.

Tableau 16 : Emissions de GES au périmètre Kyoto du CRF 1A3



Emissions de GES des transports - Kyoto								
MtCO2	1990	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2030/1990 (%)
AME	121.0	133.9	132.2	129.7	129.5	129.3	131.3	7%
AMS2	121.0	133.9	129.0	108.5	96.7	84.9	79.1	-30%

Source : CITEPA

Source : Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

Les émissions des transports routiers représentant plus de 93 % du secteur, le rapport note que ce sont les impacts de ce secteur qui présentent les effets les plus significatifs.

Les investissements envisagés dans les transports (développement de bornes de recharge électrique, ligne à grande vitesse (LGV), transport collectif en site propre (TCSP), investissements des constructeurs automobiles et surcoûts à l'acquisition des véhicules électriques principalement) se situent autour de 3 milliards d'euros par an en AME et de 4 à 6 milliards par an en AMS2, soit un total de 63,9 milliards d'euros en AME et 109,5 milliards d'euros cumulés en AMS2 de 2014 à 2035.

La croissance du PIB est supposée égale à 1,7 % en France de 2015 à 2035 en moyenne. Le prix du pétrole est supposé égal à 95,9 €/2010/baril (Brent) en 2035, avec 1,3 \$/euro, donc 124,7 \$2010.

Le prix du CO₂ est supposé égal à 57 €/2010 en 2035 en ETS, à 22 €/2010 hors ETS avec un test de sensibilité à 100 €/2015 en 2030 hors ETS.

Les transports terrestres seraient impactés par le prix hors ETS.

Les transports sont décomposés en voyageurs et marchandises puis par mode. Un modèle de parc est également utilisé.

Des hypothèses exogènes sont injectées concernant les ventes de véhicules électriques VE et de VHR véhicules hybrides rechargeables.

On arrive ainsi aux estimations de parc suivantes pour les VP et petits VUL.

Tableau annexe 14 : Evolution du parc des VP et petits VUL par énergie et par scénario

	Parc VP et petits VUL					
millions, AME	2010	2015	2020	2025	2030	2035
Essence	13.4	13.5	14.5	15.3	16.0	16.2
Diesel	22.6	23.0	21.7	21.1	20.4	20.2
GPL	0.05	0.06	0.08	0.09	0.1	0.1
GNV	0	0	0	0	0	0
Electrique	0	0.2	0.6	0.9	1.2	1.3
Hybride rechargeable	0	0.1	0.6	1.1	1.5	2.0
Total	36.0	36.9	37.5	38.4	39.3	39.8
millions, AMS2	2010	2015	2020	2025	2030	2035
Essence	13.4	13.5	14.1	14.4	14.6	14.2
Diesel	22.6	23.0	21.6	20.7	19.9	19.5
GPL	0.05	0.06	0.08	0.09	0.1	0.1
GNV	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3
Electrique	0.0	0.2	0.8	1.3	1.9	2.2
Hybride rechargeable	0.0	0.2	0.9	1.7	2.5	3.5
Total	36.0	36.9	37.5	38.4	39.3	39.8

Source : CGDD, Enerdata

Source : Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035 http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

Les mesures politiques sont les suivantes, en AME et en AMS2:

Tableau annexe 15 : Mesures prises en compte dans le secteur des transports par scénario

	Effets quantifiés pris en compte dans les scénarios, transports	
	AME	AMS2
Performances des véhicules	<p>> Véhicules particuliers neufs : Règlement n° 443/2009 et sa révision (règlement n° 333/2014) : objectif de 95 gCO₂/km en 2021. Pas d'évolution ensuite.</p> <p>Bonus-malus : structure constante du barème avec application des bonus et malus 2014 sur la période 2015-2035</p> <p>Véhicules utilitaires légers neufs : Règlement n° 510/2011 : objectif de 175 gCO₂/km en 2017 et 147 gCO₂/km en 2020</p>	<p>En 2030, la moyenne de consommation des véhicules neufs est de 2 litres / 100 km (c'est-à-dire les véhicules émettent env. 50 gCO₂ / km).</p>
Mix énergétique	<p>Directive ENR : atteinte de 9% d'ENR en 2030 dans les transports (même chose dans filières essence et gazole)</p>	<p>LTECV, art. 1, alinéa 27 : 15% des carburants d'origine renouvelable en 2030.</p> <p>Parc de véhicules particuliers : +20% de VE et VHR dans AMS2 par rapport à AMS1 en 2030. L'essor de l'autopartage (AutoLib') contribue à cette évolution</p> <p>Déploiement des véhicules au gaz</p> <p>Transport maritime : électrification à quel des navires généralisée en 2030</p>
Trafics et parts modales	<p>Développement des Lignes ferroviaires à Grande Vitesse (LGV) et des transports collectifs en site propres (TCSP) : Transports publics urbains construits entre 2015 et 2030 : métro : 16 km, tram : 380 km, bus à haut niveau de service (BHNS) : 620 km</p>	<p>Renforcement des transports publics urbains en province : Construction entre 2015 et 2030 : métro : 30 km, tram : 670 km, bus à haut niveau de service (BHNS) : 1100 km</p> <p>Prise en compte du projet du Grand Paris</p> <p>Développement du télétravail</p> <p>Libéralisation du secteur des autocars</p> <p>Prêts à 2% de la Caisse des Dépôts pour les transports propres</p> <p>Augmentation du taux d'occupation des VP sous l'effet de l'essor du covoiturage, du télétravail et des plans de déplacements d'entreprises (généralisés pour les entreprises de plus de 1000 salariés).</p> <p>Développement des modes doux (plan vélo, plan mobilité active, indemnité kilométrique)</p> <p>Réduction de la vitesse maximale sur autoroute et route nationale</p> <p>Eco-conduite</p> <p>Augmentation du fret ferroviaire et fluvial pour le fret marchandise</p> <p>Augmentation du taux de remplissage des PL pour le fret sur route en lien avec l'obligation « chargeurs » pour la grande distribution</p>

Source : DGEC

Source : Scénarios prospectifs énergie climat air pour la France à 2035
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Synthese_scenarios_2014-15_mis_en_ligne.pdf

3.4.9. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) des énergies renouvelables – avril 2016

La PPE comporte notamment une stratégie de développement de la mobilité propre.

On y retrouve (page 23) deux scénarios 1 et 2, qui semblent proches de AMS2 et AME.

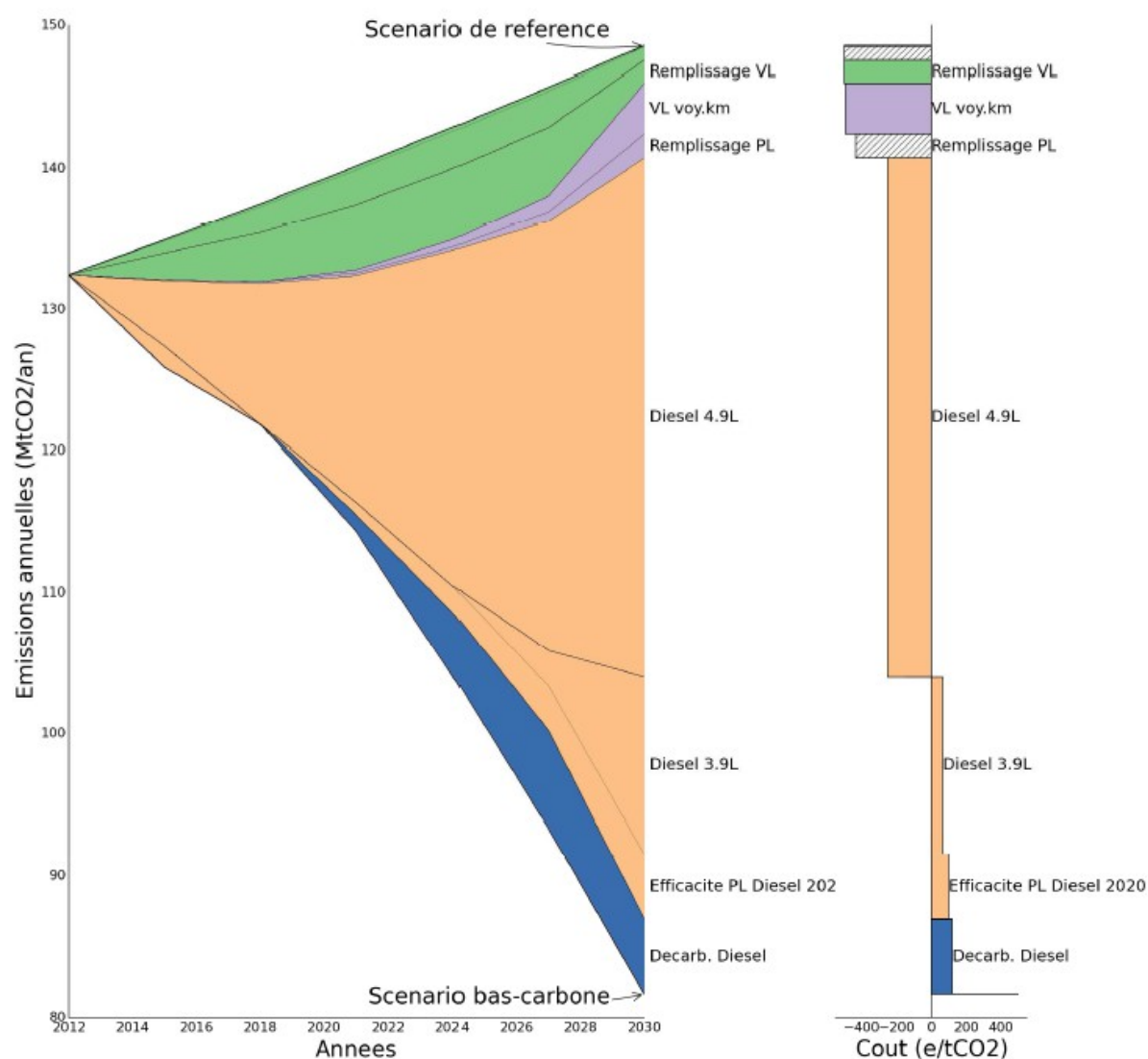
3.4.10. Un modèle de courbes dynamiques d'abattement moyen des émissions de GES

Une note du CGDD « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », dont un projet a été consulté en juin 2016 par la mission, présente des courbes dynamiques d'abattement moyen des émissions de GES permettant de quantifier les impacts et coûts de mesure, par secteur ou de manière intégrée, par rapport à un scénario « de référence » tendanciel (hors SNBC).

Le modèle recherche la minimisation des émissions de GES, dans un facteur 4 d'ici 2050, en minimisant le coût global pour atteindre cet objectif.

Pour les transports on a, à moyen terme :

Figure 6 Courbe de dynamique et de coûts moyens d'abattement en prenant en compte seulement un objectif de moyen terme (2030) – Transports



Source : « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », CGDD, 2016

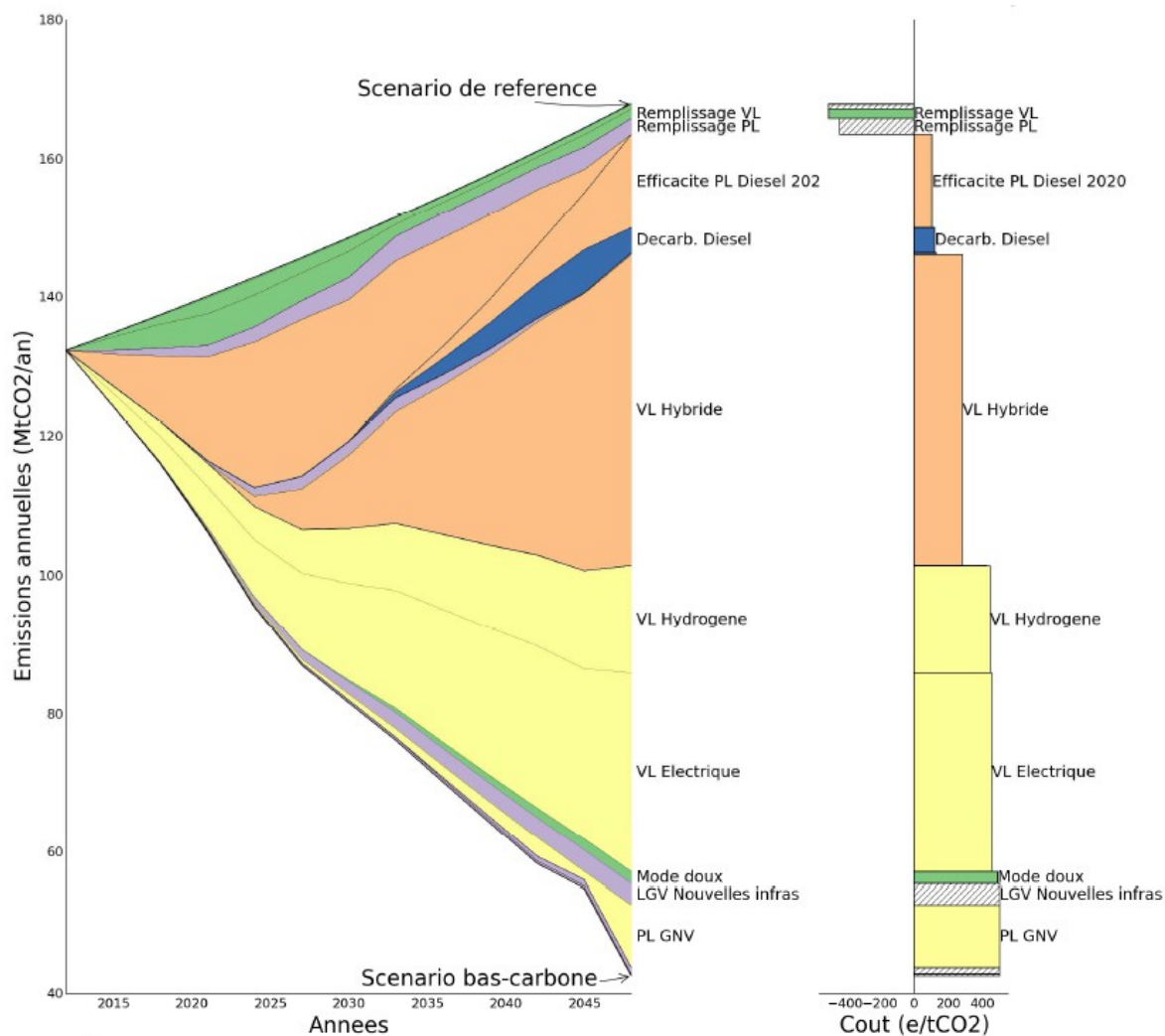
Encadré 4 : Code couleur utilisé pour l'ensemble des figures

- Gisements comportementaux
- Gisements liés à structure de la demande
- Efficacité énergétique
- Changement de source d'énergie
- Décarbonation des vecteurs énergétiques
- Capture et/ou stockage des GES
- Autres
- Hachures : fortes incertitudes sur les coûts

L'efficacité énergétique du diesel représente l'essentiel du gisement à l'horizon 2030.

Et à long terme les résultats sont:

Figure 5 Courbe dynamique de coûts d'abattement moyens avec un objectif de long terme – Transports

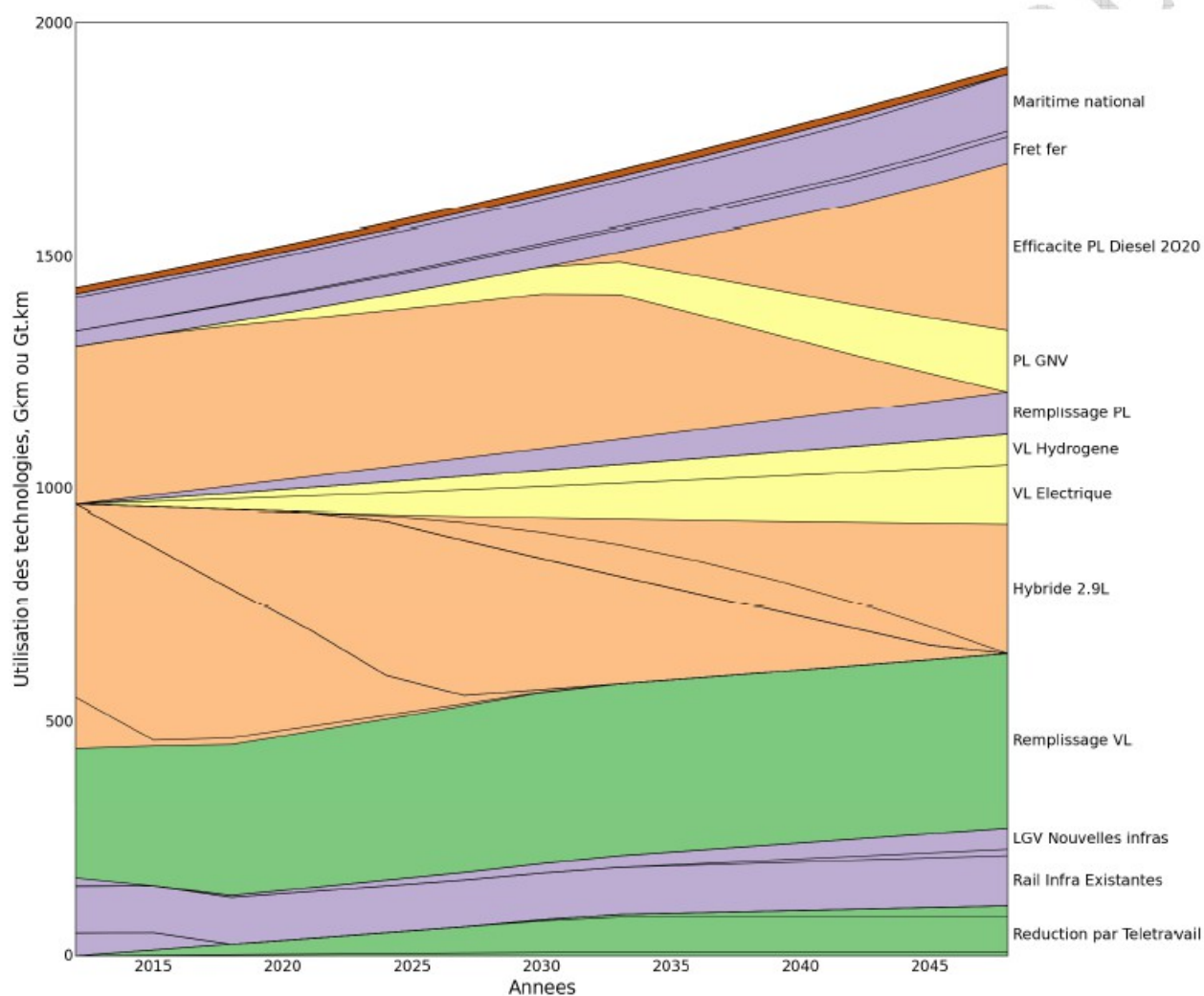


Source : « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », CGDD, 2016,

La place relative de l'efficacité énergétique décroît, au bénéfice du changement de sources d'énergie et du recours à des énergies décarbonées (véhicule électrique, hydrogène...).

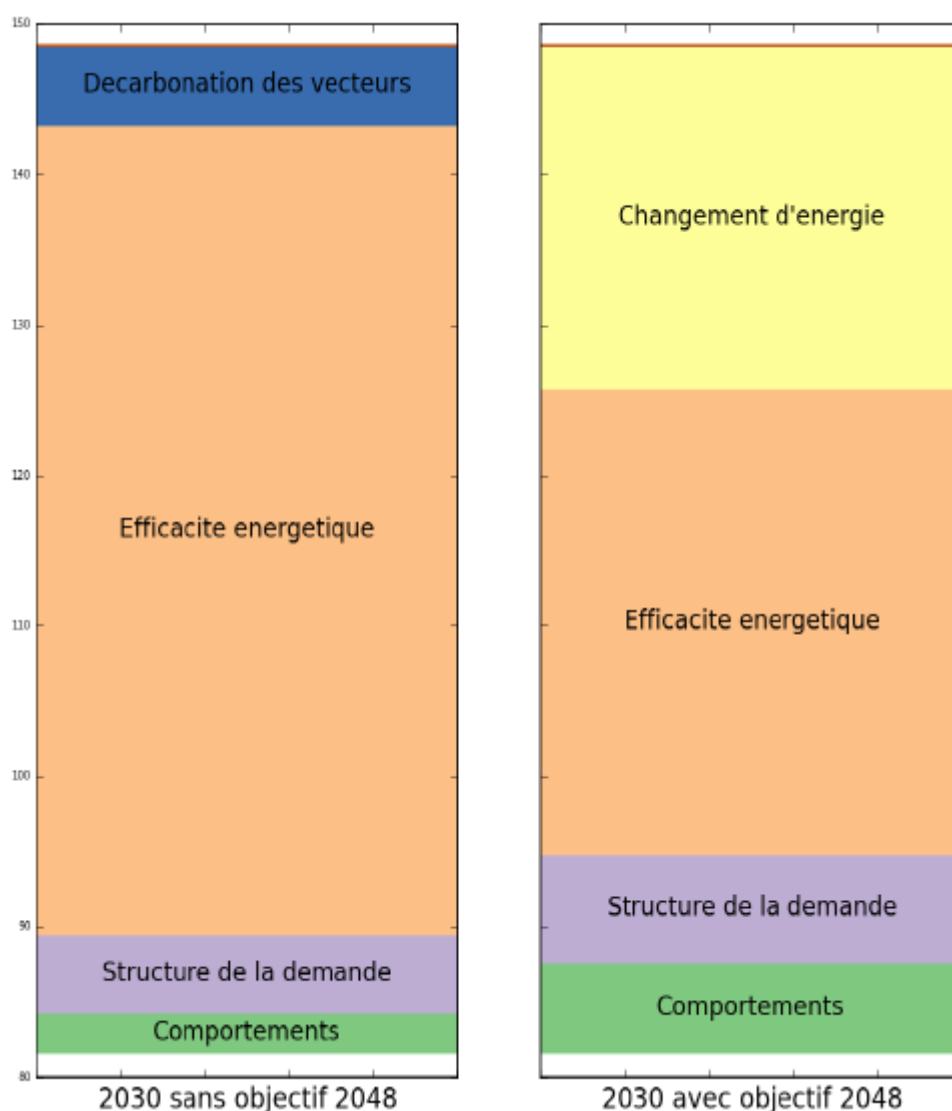
Les répartitions entre technologies varient comme suit avec le temps :

**Figure 8 Utilisation des différentes technologies ou mesures au cours du temps dans le scénario bas carbone
(en G.km pour la partie « voyageurs », et en Gt.km pour la partie « fret ») - Transports**



Source : « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », CGDD, 2016,

La répartition des effets selon le type de mesure est le suivant :



Source : « trajectoires de transition bas-carbone en France au moindre coût », CGDD, 2016,

L'essentiel des effets passe par les motorisations. Progressivement, pour les VL, les véhicules hybrides succèdent aux véhicules thermiques, puis les hybrides rechargeables, puis les électriques ainsi que les véhicules à hydrogène.

Pour les poids lourds, une place est donnée à la motorisation gaz.

Le scénario intègre un renforcement du taux d'occupation des VL. Cet effet semble important en début de période, puis s'estompe.

Probablement, du fait des faibles émissions des motorisations des véhicules hybrides rechargeables, électriques ou à hydrogène.

Cependant, la prise en compte des GES « gris » liés à la production et au démantèlement du véhicule et notamment de sa batterie, amènerait probablement à ce que la hausse du taux d'occupation réduise l'empreinte carbone des véhicules par voyageur-km. Mais l'empreinte carbone des véhicules n'apparaît pas.

On note aussi que les infrastructures de report modal, urbaines (métro, TCSP) ou interurbaines (LGV) présentent des coûts à la tonne de CO₂ réduite les plus élevés. Elles ressortent ainsi uniquement en fin de période, et encore, aux dires des auteurs, pour récupérer quelques points qui manquent en 2050. Mais initialement, vers 2050, la construction de ces infrastructures commencera par émettre du CO₂, avant d'en économiser à l'usage, avec souvent des délais de retour carbone très longs. Donc même avec cette hypothèse, pour atteindre le facteur 4 en 2050, ajouter de telles infrastructures serait même peut-être contre-productif.

3.4.11. Le scénario négaWatt, 2011

3.4.11.1. Description

L'association négaWatt a produit en 2011 un scénario dit négaWatt 2011 (mis à jour en juillet 2013) conçu pour la France métropolitaine⁸⁶ basé une démarche d'abord de sobriété, puis d'efficacité (ce qui exclut le recours à des énergies de stock et donc le recours au nucléaire, le stockage du carbone ou l'exploitation de gisements nouveaux), et enfin d'usage des renouvelables.⁸⁷

Le scénario est original en ce sens qu'il ne se limite pas à chercher à décarboner l'énergie mais repose sur les principes suivants :

- Il explore systématiquement dans tous les secteurs les « gisements de négawatts », toutes ces consommations d'énergie que l'on peut éviter grâce à des actions de sobriété et d'efficacité, puis il privilégie les énergies de flux (soleil, vent, cours d'eau, biomasse) par rapport aux énergies de stock (fossiles et nucléaire) ;
- Il ne repose sur aucun pari technologique et ne retient que des solutions éprouvées et matures, dont la faisabilité technique et économique est démontrée même si elles ne sont pas encore toutes développées à un niveau industriel ;
- Son objectif ne se réduit pas à la lutte contre le changement climatique, car il ne suffit pas de « décarboner » l'énergie : c'est l'ensemble des risques et des impacts liés à notre modèle énergétique qu'il faut réduire ! Les contraintes sur l'eau, les matières premières ou l'usage des sols sont également prises en compte.

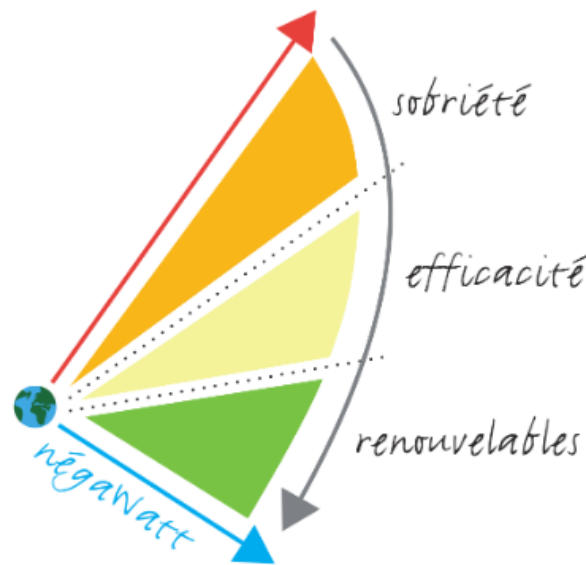
Source : http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

Les principales bases en sont la sobriété, l'efficacité et le recours aux énergies renouvelables.

⁸⁶ http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

⁸⁷ <http://www.negawatt.org>

Elle s'interroge ensuite sur les moyens les plus soutenables de satisfaire nos besoins de **services énergétiques** en appliquant une démarche en trois temps :

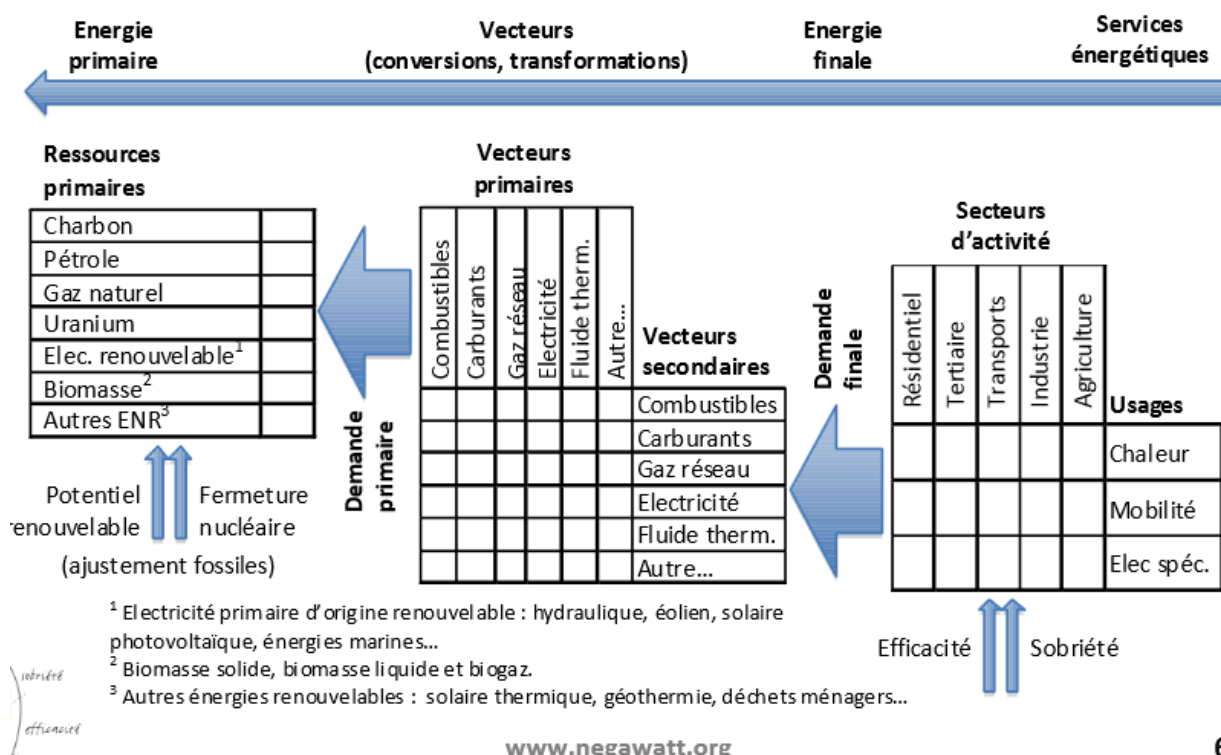


- la **sobriété**, tout d'abord, qui consiste à interroger nos besoins puis agir à travers les comportements individuels et l'organisation collective sur nos différents usages de l'énergie, pour privilégier les plus utiles, restreindre les plus extravagants et supprimer les plus nuisibles ;
- l'**efficacité** ensuite, qui consiste à agir, essentiellement par les choix techniques en remontant de l'utilisation jusqu'à la production, sur la quantité d'énergie nécessaire pour satisfaire un service énergétique donné ;
- le recours aux **énergies renouvelables**, enfin, qui permet, pour un besoin de production donné, d'augmenter la part de services énergétiques satisfaite par les énergies les moins polluantes et les plus soutenables.

Source: http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

La modélisation part donc des usages pour aller vers les ressources.

Elle identifie donc parmi les services énergétiques, un service de mobilité, et des secteurs d'activité, dont les transports.



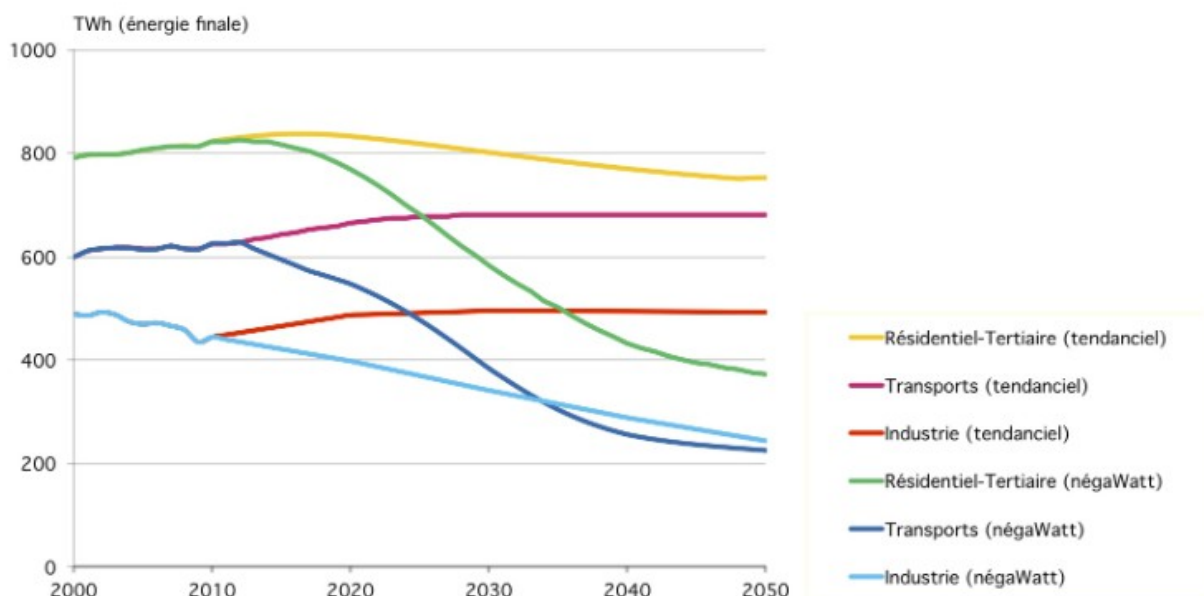
6

Source : http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

Le scénario negaWatt, global et très volontaire, « envisage une évolution différenciée, selon les solutions les plus adaptées en fonction des motifs de déplacement, des distances à parcourir et de la densité d'infrastructures de transport sur le parcours, de l'espace rural à l'hypercentre urbain ». Pour cela il bâtit sur une réduction des besoins en déplacement (passage de 61 % en 2012 à 49 % en 2050 du nombre de km/voyageur parcourus en voiture, modes de déplacement doux), l'amélioration de l'efficacité des moteurs faisant diminuer la consommation unitaire des moteurs de 57 % entre 2012 et 2050), mais surtout le passage au véhicule électrique (21 % des km parcourus en 2050) et au gaz (65 % des déplacements automobiles en 2050, 83 % des transports par camion en 2050).

Pour les transports, le scénario aboutit à 67 % de réduction des besoins énergétiques, ce qui en fait le plus gros gisement d'économies d'énergies de 2030 environ à 2050.

■ **Evolution comparée des consommations énergétiques finales par grand secteur d'activité, entre le scénario négaWatt et le scénario tendanciel (en TWh)**



Source : http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

Le scénario prévoit ainsi une baisse de mobilité par personne, de 25 %. L'approche combine à cet effet la densification des espaces urbains et la revitalisation des espaces ruraux, le développement du commerce en ligne et celui du télétravail.

La part modale de la voiture en voyageurs-km chute à 49 % contre 61 % actuellement. Et ce au moyen du vélo à petite distance, des TC, des autocars à plus longue distance, ainsi que des services d'autopartage et de taxis collectifs.

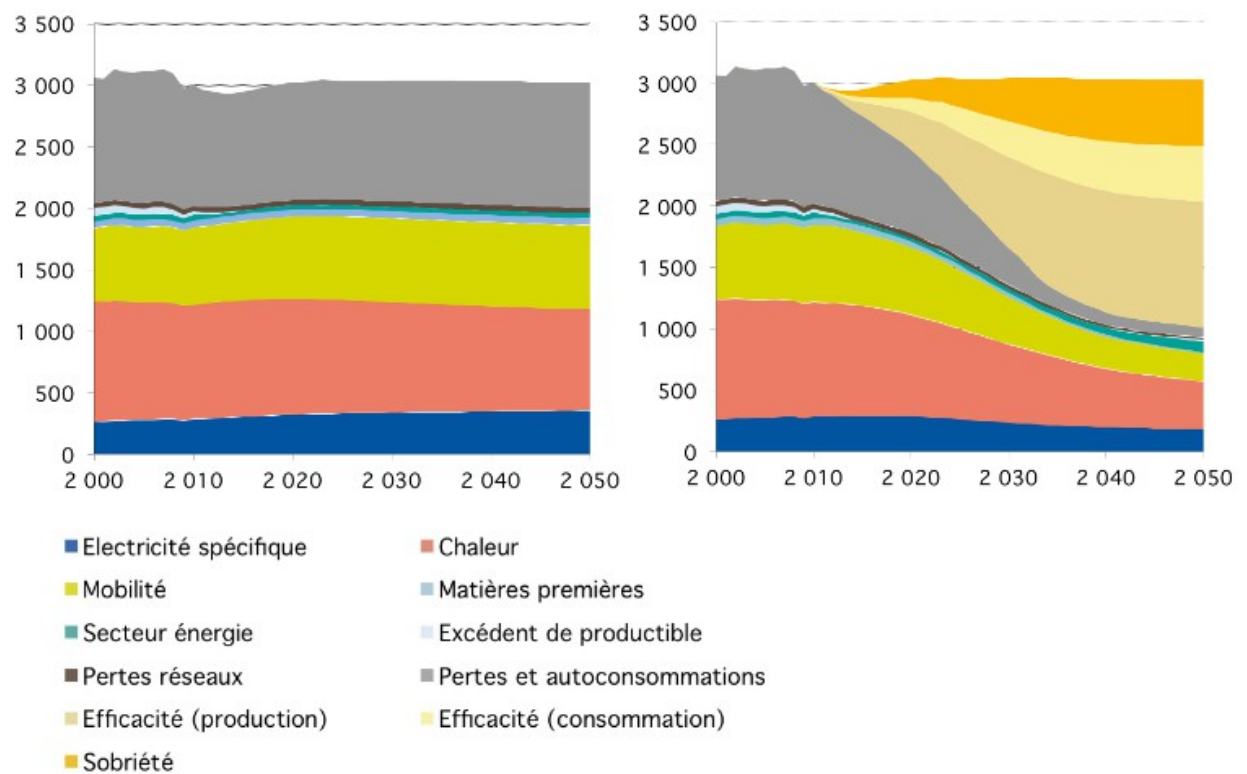
Du point de vue des motorisations, deux filières sont envisagées pour les VL

- Le véhicule électrique, adapté aux trajets courts en milieu urbain, mais posant des problèmes de réseau et de matières premières.
- le véhicule à gaz, au départ au GNV fossile, puis au gaz renouvelable GRV (biogaz, et gaz de synthèse).

Pour les PL, une dominante (83%) de carburants gaz est envisagée en 2050, avec une électrification pour les petits VUL urbains. Le remplissage des PI augmente. Le fer atteint 40 % des tonnes-km en 2050, et le fluvial 5 %.

On arrive ainsi aux consommations énergétiques finales suivantes en tendanciel et en scénario Negawatt.

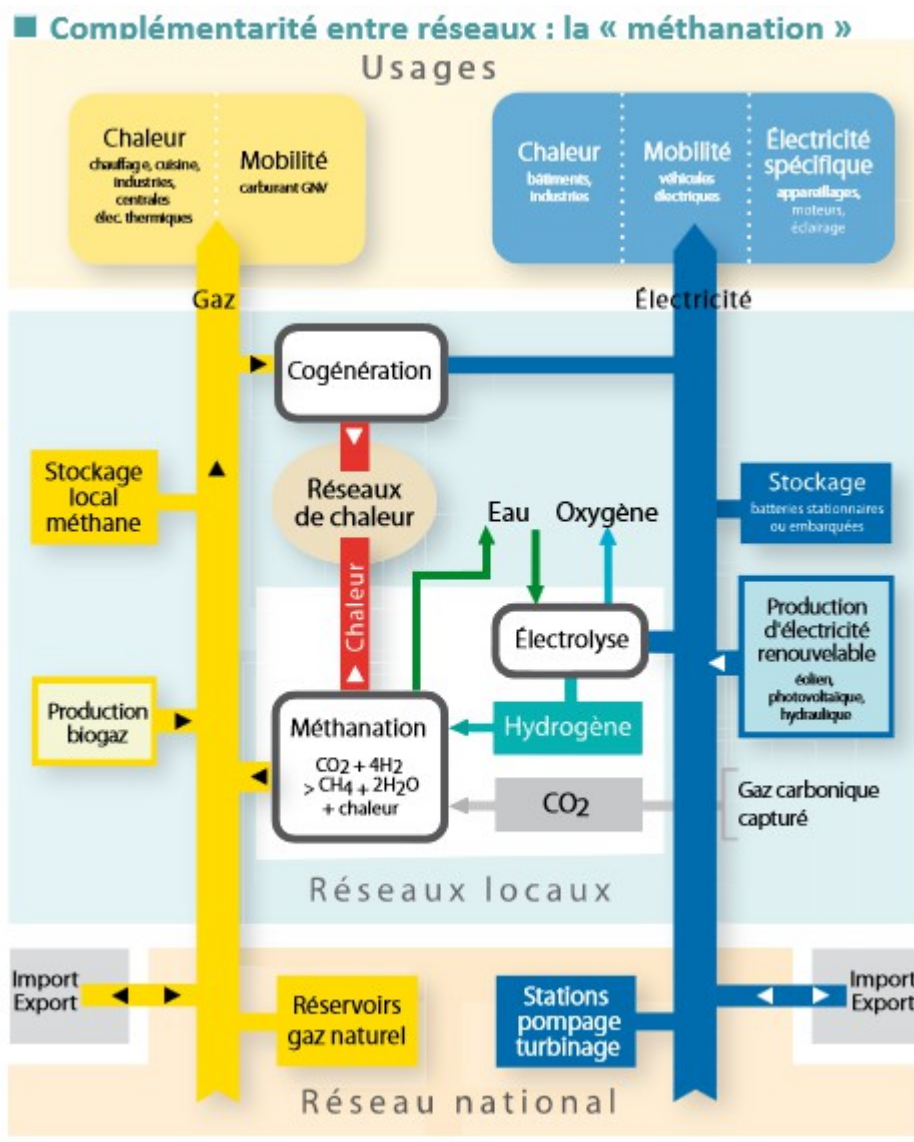
■ Evolution comparée des consommations énergétiques finales par usages
entre le scénario tendanciel et le scénario négaWatt (en TWh)



Source : http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

Les énergies renouvelables se développent, les fossiles diminuent très fortement, tandis que le nucléaire fait l'objet d'un abandon « progressif et raisonné ».

Le système énergétique est ainsi revu comme dans le diagramme global suivant, avec une double filière:



Source : http://www.negawatt.org/telechargement/SnW11/Scenario-negaWatt-2011_Dossier-de-synthese.pdf

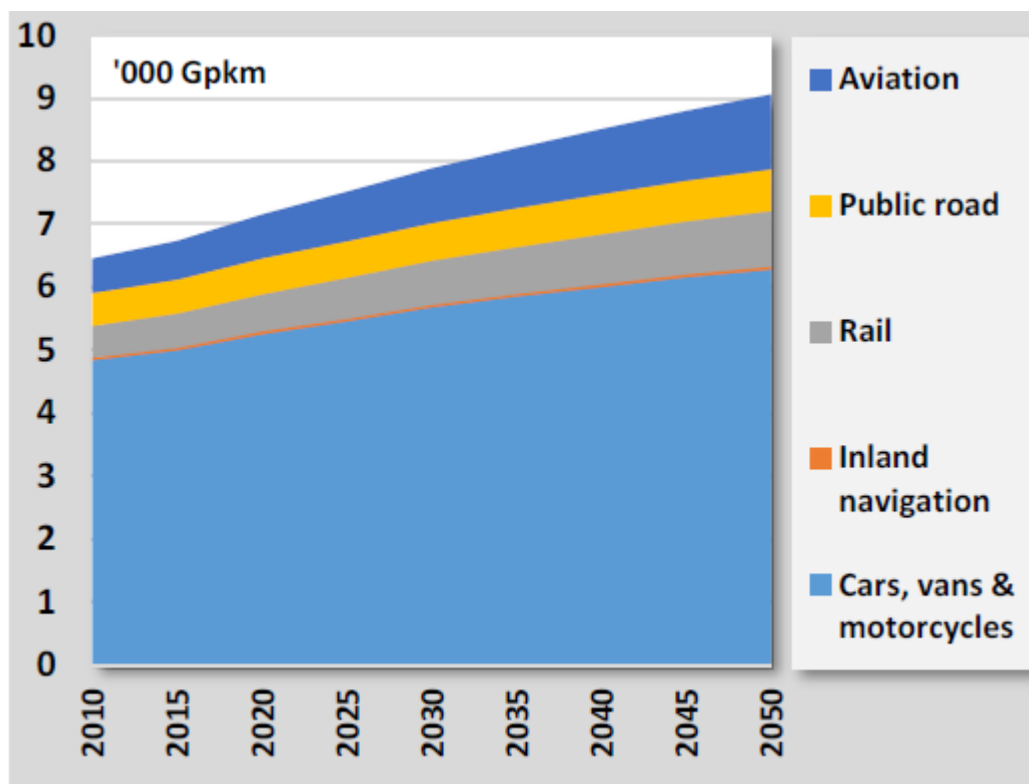
Le stockage inter-saisonnier d'énergie via le méthane permet ainsi de répondre à la demande même en saison de plus forte demande.

3.4.12. Le scénario transport de l'Union européenne (2016)

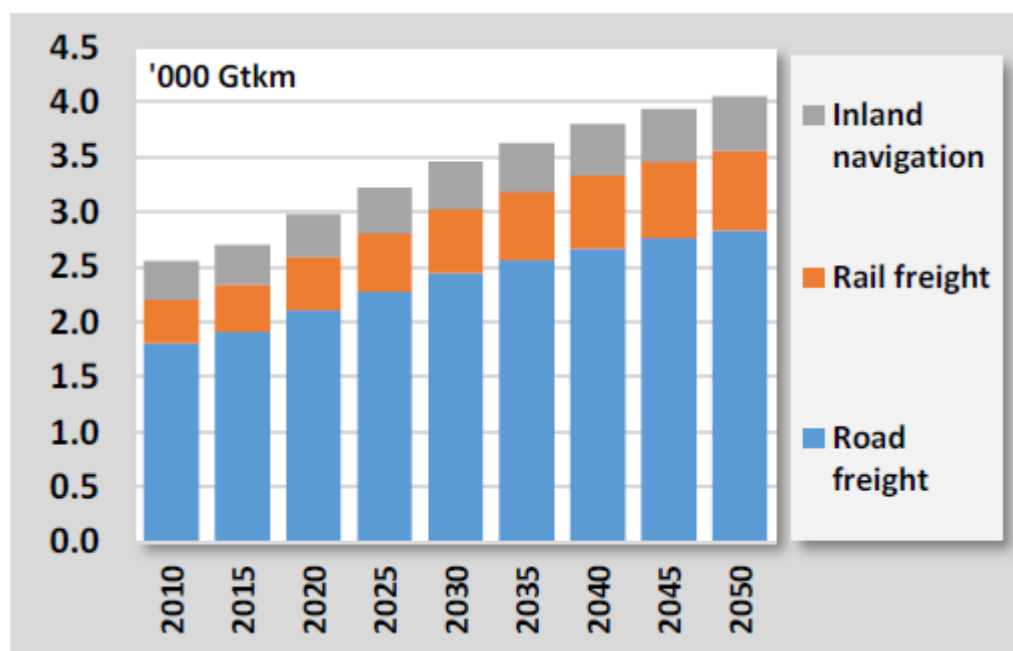
Ce scénario a été publié à l'été 2016⁸⁸. Il se démarque assez profondément des évolutions décrites dans cette annexe en ne prévoyant pas en particulier une électrification des VL.

Ce scénario table sur une progression importante de l'activité transport, tant pour les passagers que pour le fret.

⁸⁸ https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf



Evolution de la demande passager (avec aviation internationale) – source, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

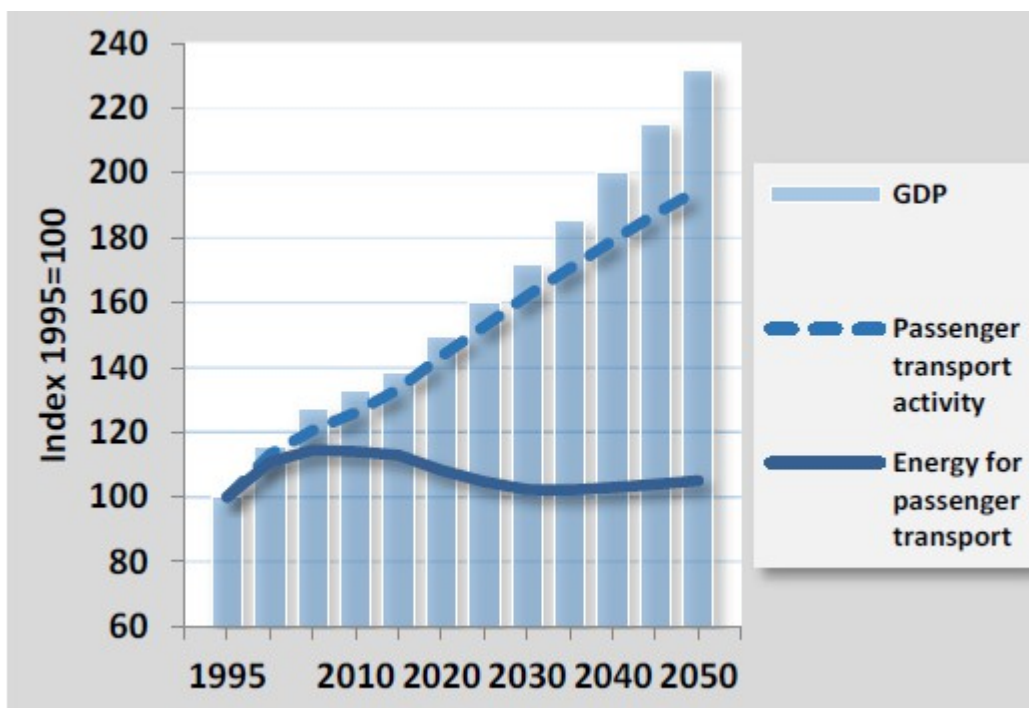


Evolution de la demande fret (sans trafic maritime international) – source : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

La demande de transport passager s'infléchit après 2030. La proportion de transports assurés par les VL reste dominante, mais diminue, passant de 73 % en 2010 à 67 % en 2030. Le trafic aérien est le segment qui croît le plus vite, à un rythme annuel de 2 % (+ 125 % entre 2010 et 2050).

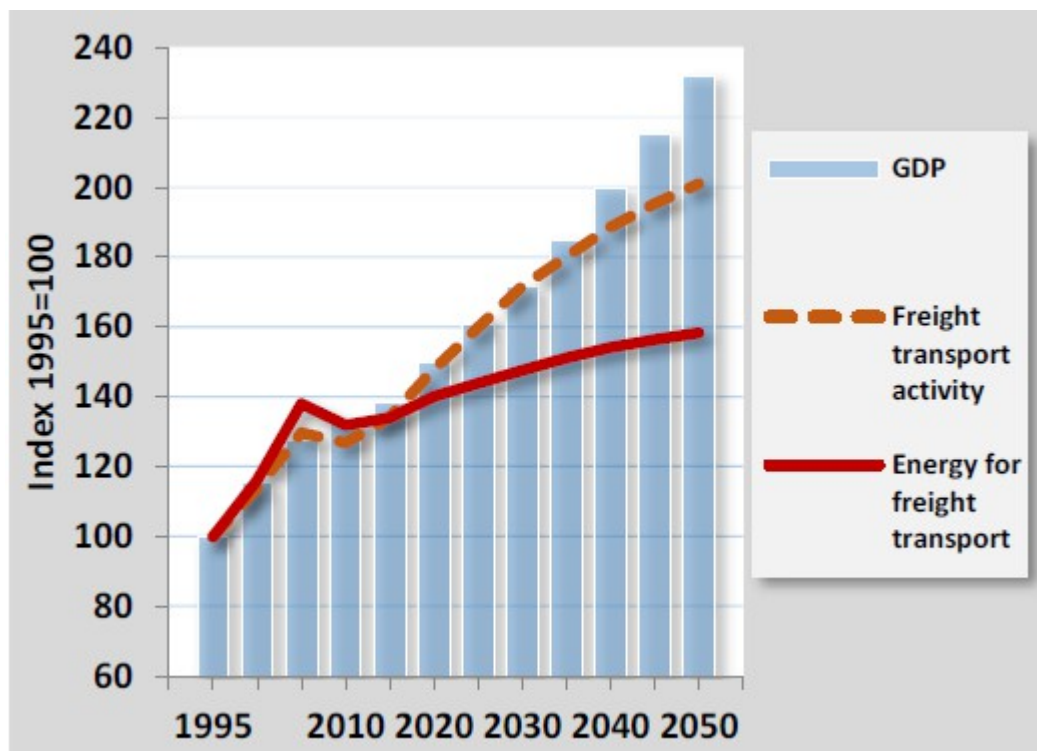
Le trafic marchandise continue à être dominé par la route. Le trafic routier croît de 57 % entre 2010 et 2050. Le trafic maritime international, non représenté sur le graphe, croît de 70 %.

La demande énergétique, elle, se stabilise grâce aux progrès d'efficacité énergétique réalisés en particulier dans le domaine des VUL et des VL.

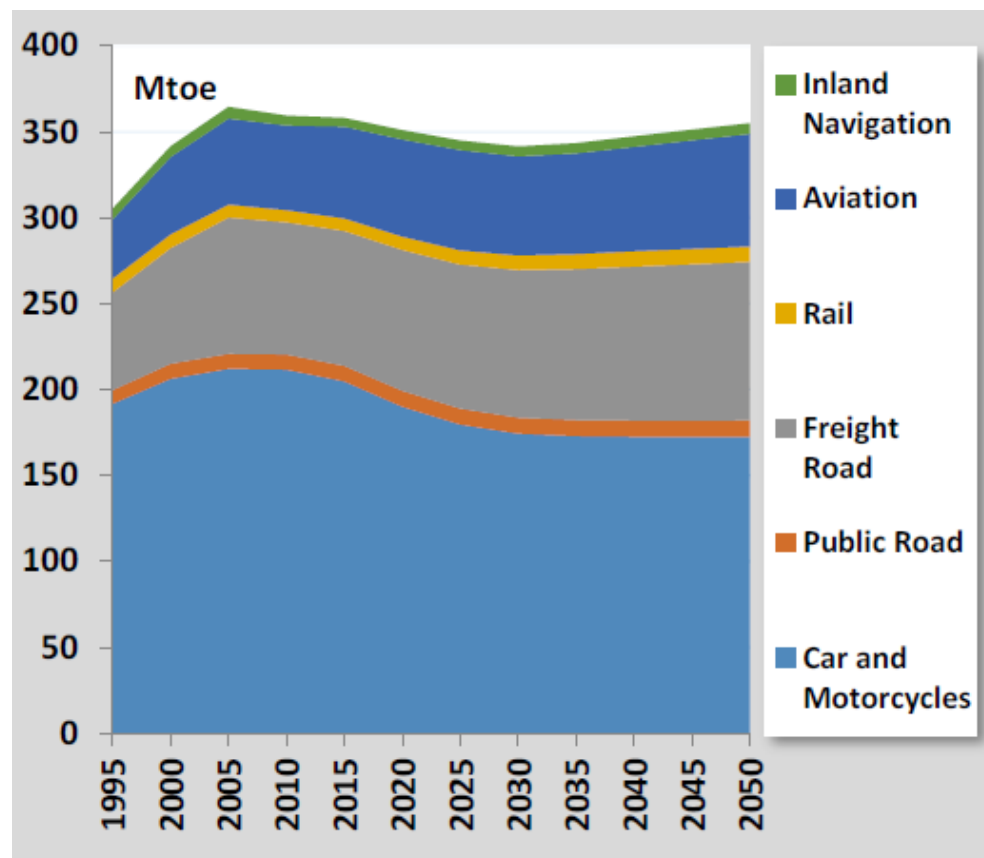


Demande énergétique pour le transport voyageur (y compris aviation internationale)– source :

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf



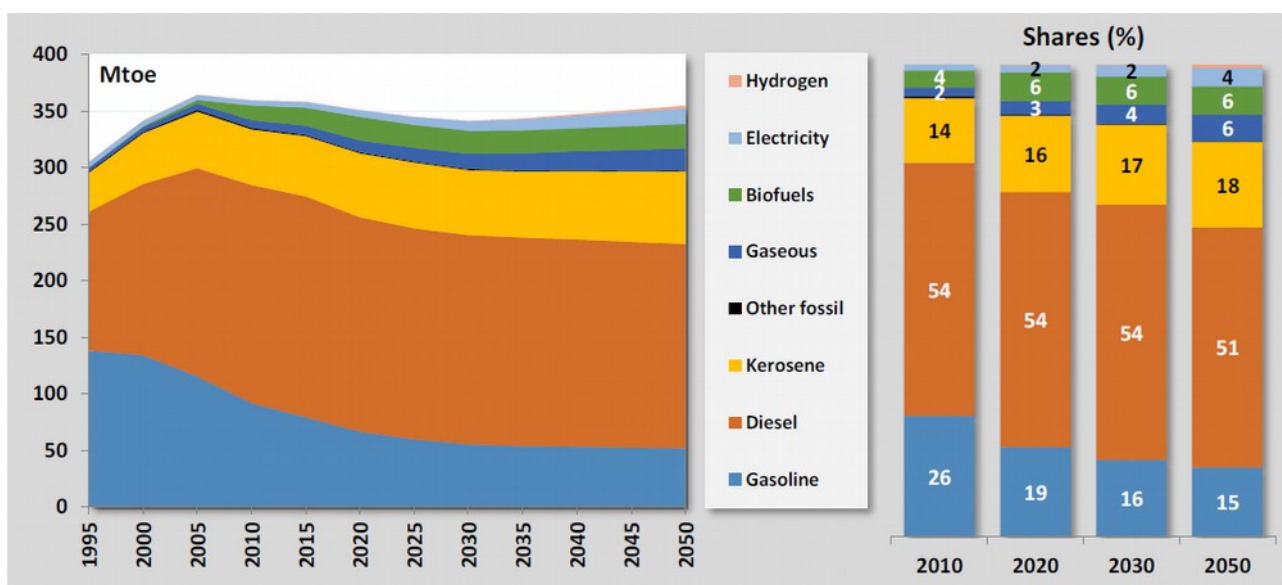
Demande énergétique pour le transport de marchandise (sans trafic maritime international) – source : https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf



Demande finale énergie (hors transport maritime international, 50 Mtep en 2010 et 70 Mtep en 2050)– source :

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

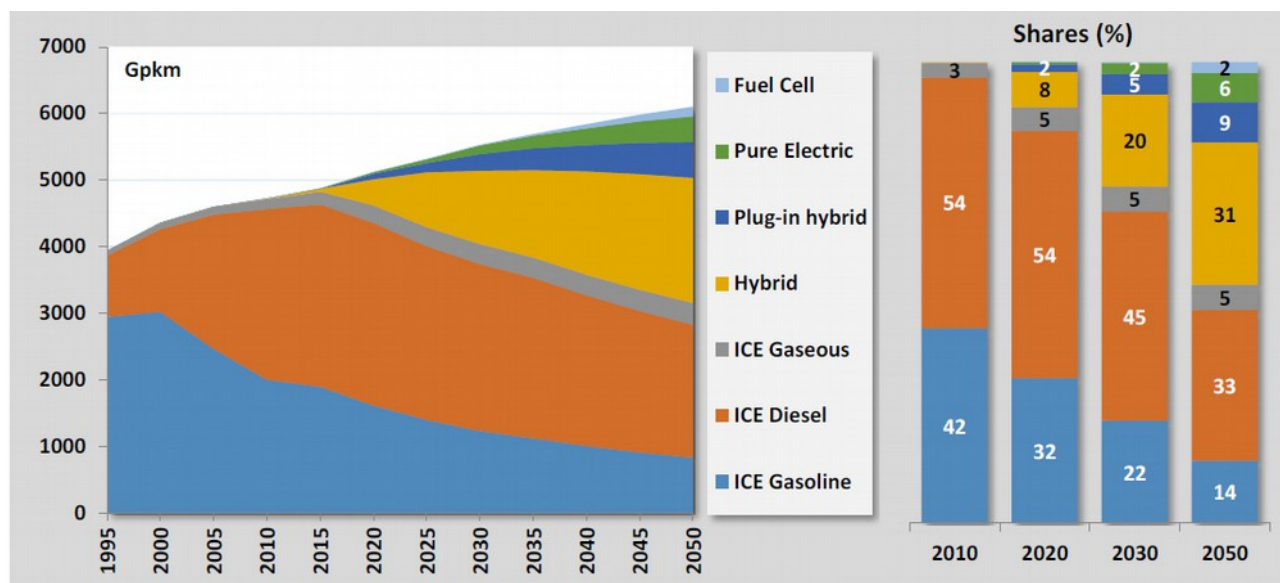
Si l'on s'intéresse au type d'énergies, le gasoil reste l'énergie dominante dans les transports, tandis que la diminution de l'essence reflète l'amélioration de l'efficacité énergétique des VL et VUL. Le GNL gagne de parts de marché pour les PL. Le biokérosène fait son apparition dans l'aviation, soumis à la directive ETS. L'électricité gagne progressivement quelques parts de marché mais sa part n'atteint que 4 % en 2050.



Répartition des énergies utilisées dans les transports– source :

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

Corrélativement, les véhicules électriques et hybrides gagnent des parts de marchés, mais demeurent minoritaires à échéance 2050, même en ne considérant que les VL et VUL.

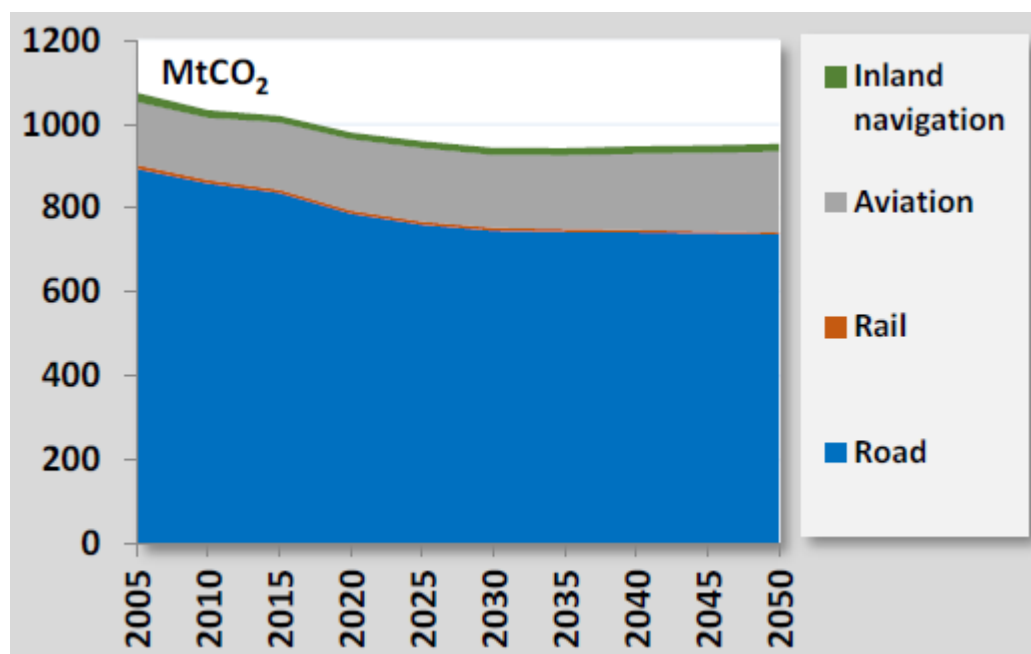


Part des différentes motorisations dans le parc des véhicules VL et VUL–

source :

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

Dans ces conditions, les émissions de GES du secteur transport ne diminuent que relativement peu.



Émissions de GES du secteur transport (transport maritime exclu (lesquelles augmentent de 38 % entre 2010 et 2050)– source :

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/REF2016_report_FINAL-web.pdf

4. Perspectives liées aux évolutions des comportements et des usages dans les transports

4.1. L'apparition de la contrainte carbone doit réduire la quantité et la vitesse des déplacements toutes choses égales d'ailleurs

Revenons à quelques généralités micro-économiques pour poser les principes des évolutions des comportements et des usages dans les transports.

Si on se situe dans une perspective où le carbone (et plus généralement les GES) présentent un prix croissant pour tenir compte des externalités produites, alors si on considère toutes choses égales d'ailleurs que l'utilisateur tire un avantage A d'un déplacement, qui lui coûte N en numéraire hors carbone, et lui prend un temps de durée T avec une valeur unitaire du temps $ValTemps$, qu'il émet une quantité C en carbone, avec un prix unitaire pC par tonne, alors, son programme va consister à se déplacer s'il y trouve une utilité nette positive soit :

$$A > N + C \times pC + T \times ValTemps$$

Autrement dit l'avantage doit être supérieur au coût.

Au début, si $pC = 0$ (le prix du carbone est nul, ou encore il est gratuit d'émettre du gaz à effet de serre), il réalise son déplacement si $A > N + C \times 0 + T \times VT = N + T \cdot ValTemps = A_0$

On voit ainsi que si A devient inférieur à $A_0 + C \cdot pC$, le déplacement n'est plus intéressant : il y a donc dans ce cas désinduction liée à la hausse des prix du transport.

En fait, le choix pour l'utilisateur ne se résume pas à un choix binaire de se déplacer ou pas. Il peut aussi prendre des mesures de ralentissement, pouvant consister à réduire sa vitesse, se reporter vers un mode plus économe en carbone mais plus lent, éventuellement aussi partager son véhicule, ce qui réduit le coût de revient, et le coût en carbone mais au prix d'un supplément de temps et de contraintes de diverses sortes.

Le coût généralisé du déplacement s'écrit $N(v) + C(v) \times pC + (d/v) \times ValTemps$. Le coût numéraire est en général décroissant avec v (sauf pour des vitesses très faibles s'il y a des coûts proportionnels au temps), les émissions de carbone aussi. Il y a donc en général une vitesse v^* qui minimise les coûts généralisés de déplacement, caractérisée par -sauf solution aux limites :

$$dN/dv(v^*) + dC/dv(v^*) pC - d ValTemps / (v^{*2}) = 0$$

et donc la vitesse optimale ressort à

$$v^* = \sqrt{(d ValTemps / (dN/dv + pC dC/dv))}$$

Lorsque le prix du carbone augmente, le dénominateur augmente et donc la vitesse optimale du point de vue de l'utilisateur baisse mécaniquement.

On peut donc s'attendre à ce que toutes choses égales d'ailleurs les vitesses de déplacement décroissent du fait du renforcement progressif de la contrainte GES. Cela va à l'encontre des tendances constatées depuis des siècles, où les vitesses ont eu tendance à croître avec les progrès des véhicules, des motorisations (moteur à vapeur puis à explosion) et des infrastructures (voies de chemin de fer au XIX^{ème} siècle, autoroutes au XX^{ème} siècle), et où des modes de plus en plus rapides sont apparus (avion, train à grande vitesse notamment). Il en a été de même avec les portées des déplacements qui se sont allongées.

Cela ne remet pas en cause les bilans socio-économiques positifs de nombreuses infrastructures construites pour aller plus vite et permettre ainsi la croissance des échanges de marchandises et des déplacements des personnes qui restent, toutes choses égales d'ailleurs, des facteurs de progrès économique et social.

Mais l'apparition d'une contrainte globale est susceptible en quelque sorte d'inverser la vapeur en matière de quantité de déplacement ou de vitesse moyenne, toutes choses égales d'ailleurs.

On notera cependant que l'avenir n'est pas toutes choses égales d'ailleurs, puisqu'il y a du progrès technologique, notamment dans les technologies de l'information et de la communication, qui sont susceptibles au contraire de contribuer à la croissance économique et à la satisfaction des besoins des utilisateurs.

4.2. La limitation des déplacements par la fiscalité des carburants

C'est le moyen le plus direct pour réduire les déplacements et les émissions de GES. L'augmentation des prix réduit les quantités de déplacements, incite à l'usage de véhicules plus sobres et peut également inciter au report modal.

Il y a cependant un problème pour la mise en œuvre d'une telle solution : les élasticités prix de la demande dans les transports sont assez faibles, surtout à court terme, et donc il faut une augmentation sensible des taxes par litre de carburant pour commencer à obtenir un effet visible sur les circulations.

Si l'élasticité prix de la demande de transport en voitures particulières (VP) se situe à -0,15 environ à court terme (c'est-à-dire qu'une augmentation des prix de 1 % se traduit par une baisse de 0,15 % de la demande), on peut utiliser une valeur de -0,3 à plus long terme, ce qui paraît à première vue adapté à un objectif à un horizon 2050.

Supposons par exemple que l'on vise une réduction de 10 % des déplacements en VP. Il faudrait donc une augmentation des prix des carburants de $10/0,3=33$ %. Si on situe le prix des carburants à 1,2 euros par litre environ, cela amène à une augmentation de la fiscalité sur les carburants (essentiellement TICPE) de 40 centimes par litre, passant le prix des carburants à 1,6 euros le litre en moyenne. À environ 2,5 kgCO₂ par litre (un peu moins en essence, un peu plus en gazole), on arrive à un prix du CO₂ de 160 euros/tCO₂ pour obtenir un effet de modération de la circulation de 10 % à long terme.

Même en tenant compte des effets sur la cylindrée des véhicules, qui peut faire monter l'élasticité de la demande de carburant au prix autour de -0,5 à long terme, on obtient une hausse de prix de 24 centimes par litre, soit un prix de presque 100 euros/tCO₂ au minimum.

On mesure avec ce petit exemple la difficulté de l'action par la fiscalité. Bien sûr, pour un objectif à 35 ans (2050-2015), si on ajoute par exemple 1 centime par litre (au-delà

de l'inflation) et par an d'ici 2050, à la fin on a ajouté 35 centimes par litre, soit environ 140 euros/tCO₂) aboutissant à une réduction des circulations de 9 % et de 15 % des consommations et donc de 15 % des émissions de GES tant que l'on raisonne sur des motorisations essentiellement thermiques bien sûr. À terme, pour les déplacements du quotidien, si la motorisation est électrique, il conviendra de raisonner en d'autres termes. Ceci dit, si le nombre de cycles d'une batterie est donnée, la réduction des circulations se transforme en réduction d'émissions de GES « gris » à la production et démantèlement du véhicule et surtout de sa batterie. On peut donc continuer de raisonner en % en première approche.

L'action par la fiscalité pose en outre le problème de ses impacts sociaux. Elle frappe aussi par construction les ménages les plus contraints économiquement. Ceci peut dans une certaine mesure être perçu moins négativement si le produit de la taxe est redistribué de manière visible et crédible y compris à destination des ménages les moins aisés.

4.3. Le bonus-malus CO₂ à l'achat automobile et la prime de conversion

Un système de bonus-malus CO₂ à l'achat d'automobiles neuves a été mis en place en France en 2008. Il a depuis lors été reparamétré plusieurs fois pour tenir compte des progrès dans les émissions unitaires des véhicules neuves, et le rééquilibrer sur le plan budgétaire, le dispositif ayant été au départ plus un bonus qu'un malus.

Son principe est de rendre plus onéreux à l'achat les voitures les plus émissives, et donc d'en dissuader l'achat, et au contraire de rendre moins onéreuses à l'achat les voitures les moins émissives, et donc d'en encourager l'achat. A moyen terme, cela pourrait également inciter les constructeurs à proposer des modèles moins émissifs.

Par rapport à la fiscalité sur les carburants, à l'usage, le système du bonus malus à l'achat peut être complémentaire. En particulier, si on se limitait à une taxation du carbone dans le carburant, il pourrait y avoir des automobilistes ayant au départ acheté un véhicule émissif, n'ayant pas anticipé les hausses de fiscalité sur les carburants, et risquant de se trouver en quelque sorte « piégés » au cours de la durée de vie du véhicule, entre 10 et 15 ans en général (avec plusieurs propriétaires du véhicule en général au cours de sa vie). Pour les pouvoirs publics, cela permet d'agir sur les performances GES des véhicules en moyenne dès l'achat, et donc d'espérer des effets de réduction des GES sans contraindre les conducteurs à rouler moins, ce qui peut limiter leur bien-être économique, et du coup être mal vécu, et donc renforcer l'hostilité à des relèvements de TICPE qui devraient être effectués, notamment dans le cadre de la perspective du facteur 4 de réduction des GES.

Quel a été l'effet concret du dispositif ?

On dispose d'une étude tout d'abord d'une étude de 2010, du CGDD⁸⁹. Elle conclut sur la période 2008 et 2009 à un bilan environnemental positif et économique positif, avec des réductions des émissions de CO₂. Elle note une hausse des parts de catégories les moins émissives et le contraire pour les plus émissives. Elle note toutefois que l'effet rebond lié à la hausse des circulations entraînées par la baisse du coût unitaire du km doit réduire l'effet positif.

⁸⁹ Une évaluation du bonus malus écologique, CGDD, 2010 <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/LPS53.pdf>

Une étude postérieure de l'Insee, datant de début 2012⁹⁰, approfondit l'analyse et parvient en fait à une conclusion en sens inverse.

À court terme, elle conclut à une incitation paradoxale à l'augmentation des émissions de CO₂. Certes la proportion des véhicules les moins émissifs (classe B, - de 120 gCO₂/km) est passée de 20 % en fin 2007 à 32 % en 2008, tandis que les véhicules les plus émissifs, de classe E, avaient vu en même temps leur proportion, de 15 % à fin 2007 être divisée par 2.

Mais l'étude pointe que globalement, les flux d'immatriculations pour les particuliers ont augmenté de 7,4 % entre octobre 2007 et mars 2008, hors variations saisonnières. Elle indique que la baisse des émissions unitaires, peut, en rendant les circulations unitaires moins onéreuses, entraîner des allongements de parcours, par effet rebond. La mesure peut aussi, dans le paramétrage initial notamment, inciter globalement à l'achat d'un plus grand nombre de véhicules, renforçant le parc et donc les émissions de GES également. Et la production de véhicules émet des GES.

Au total, au moins initialement, l'étude de l'Insee conclut à une hausse des émissions de GES de 1,2 % liée à la mesure.

A plus long terme, son évaluation est plus nuancée. Elle indique qu'il y a peut-être eu des effets d'anticipation à court terme. Également, un système plus équilibré, avec davantage de malus qu'initialement, devrait réduire l'incitation à acheter des véhicules neufs. Ce reparamétrage a d'ailleurs eu lieu.

Cependant, le risque d'un effet rebond non négligeable sur les kilométrages parcourus reste réel structurellement. L'étude est donc plus ouverte sur le long terme, mais ne conclut pas de manière tranchée dans un sens ou un autre. Elle conclut que *«l'exercice permet néanmoins d'illustrer la complexité des canaux par lesquels une politique d'incitations financières peut affecter les comportements et les difficultés qui en découlent pour son calibrage, tant environnemental que budgétaire »*.

L'impact du bonus malus, sans être forcément contre productif semble donc en tout cas assez faible, surtout dans les conditions des premières années, où le bonus l'emportait sur le malus. Plus tard, le bonus a été rééquilibré, avec un léger excédent e 141 ME en 2014.

Le décret du 31 décembre 2015 renforce le système du bonus malus. Désormais, le bonus est réservé aux véhicules électriques ou hybrides émettant moins de 110 gCO₂/km. Le malus touche les véhicules émettant plus de 130gCO₂/km. De plus, une prime de conversion est versée, pour le remplacement d'un véhicule diesel, mis en service avant 2001, par un véhicule propre. Elle est cumulable avec le bonus malus.

Ainsi, par exemple pour un véhicule électrique, le bonus malus de 6 300 euros s'ajoute à la prime de conversion de 3 700 euros pour atteindre au total 10 000 euros. Ou bien, pour un véhicule de moins de 62 gCO₂/km, le bonus malus de 1 000 euros s'ajoute à la prime de 2 500 euros pour donner 3 500 euros.⁹¹

⁹⁰ Le bonus malus écologique, éléments d'évaluation, Insee analyses, janvier 2012, <http://www.insee.fr/fr/ffc/iana/iana3/iana3.pdf>

⁹¹ Le bonus malus en 2016, CEDEF, ministère de l'économie et des finances <http://www.economie.gouv.fr/cedef/bonus-malus-vehicule-neuf>

Une étude suédoise récente⁹² simule l'effet d'un système de bonus malus CO₂ potentiel dans ce pays, au moyen d'un modèle de parc. Le modèle intègre des effets de choix de modèles de véhicules, d'usage de ceux-ci, mais aussi de choix de destruction (« scrapping ») de ceux-ci. Il tient compte d'évolutions tendanciennes des technologies de motorisation.

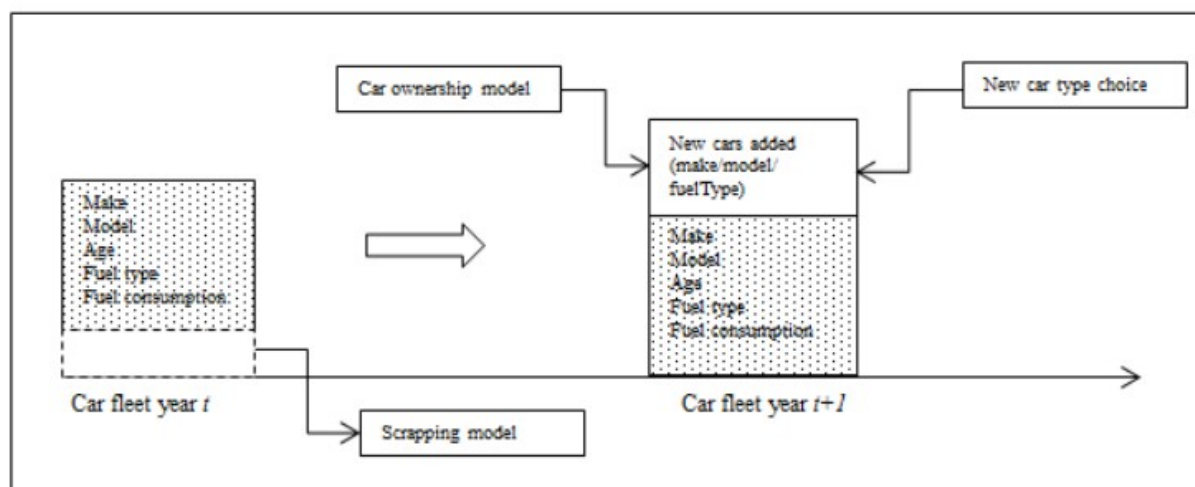


Figure 3: Swedish car fleet model system

Système modélisé du parc automobile suédois – source, Evaluation of bonus malus systems for reducing car fleet CO₂ emissions in Sweden, center for transport studies, Stockholm, 2015

<http://www.transportportal.se/swopec/CTS2015-6.pdf>

Dans le contexte suédois, l'étude conclut à ce que globalement un système de bonus-malus correctement paramétré conduit à des réductions des émissions de CO₂. Cependant, l'effet est assez limité, et l'étude indique que le système n'est pas paramétré assez négativement pour atteindre l'objectif de 95 gCO₂/km à l'horizon que le gouvernement suédois s'était fixé. Elle note aussi que le modèle prévoit des effets parfois paradoxaux dans les comportements d'achat, notamment des entreprises achetant des voitures.

Que peut-on penser de tout cela ? A priori, un système de ce type, correctement paramétré devrait inciter à réduire les émissions de CO₂. Cependant, les acheteurs de véhicules réagissent aux incitations qui leur sont données, et les technologies évoluent avec le progrès technique. Il y a aussi de l'effet rebond, vraisemblablement non négligeable.

Pour garantir un effet globalement à la baisse des émissions de CO₂, il faut donc paramétrer un tel système en tenant compte de ces effets, donc de manière très prudente, avec un système prévu initialement pour produire davantage de malus que de bonus. Au fur et à mesure que les acheteurs changent leur comportement d'achat, et que le progrès technologique avance, il conviendrait de reparamétrer dans le sens d'une sévérité accrue de ce type de système, et le faire non pas avec un délai, mais préventivement.

⁹² Evaluation of bonus malus systems for reducing car fleet CO₂ emissions in Sweden, center for transport studies, Stockholm, 2015 <http://www.transportportal.se/swopec/CTS2015-6.pdf>

Les incitations au retrait du parc ancien le plus émissif doivent également contribuer à un bon bilan du dispositif. Là aussi, périodiquement, et par anticipation, il convient de durcir les conditions d'éligibilité des véhicules à remettre pour destruction.

Enfin, il faut aussi tenir compte des écarts entre les émissions affichées sur des cycles théoriques et ce que l'on constate dans la réalité, et ce notamment pour les hybrides, où les écarts semblent importants.

4.4. La généralisation de l'électrification et des biocarburants amènera à revoir la fiscalité transports

Un des premiers coûts pour les pouvoirs publics d'un scénario d'électrification de masse des transports serait la perte de recettes de TICPE liée aux transports. Pour un montant unitaire de l'ordre de 51 centimes par litre de gazole et de 63 centimes pour le SP E10 dans la plupart des régions en 2015, la recette globale de la TICPE transports est estimée à plus de 26,2 milliards d'euros par an en 2015 (source CCTN, hors taxes liées à la production de transport telles que taxe sur la valeur ajoutée -TVA-, cotisations sociales, taxe professionnelle -TP-, impôt sur les sociétés -IS-,...).

Globalement, cela amènerait à terme, en cas d'électrification complète, une perte de recette publique de 26 milliards d'euros.

Certes les externalités en matière de GES diminueraient, ainsi que la pollution de l'air et le bruit. Par contre la question peut se poser, dans un tel scénario, du financement de la maintenance du réseau routier (hors secteur concédé et sans même parler développement) pour lequel un nouveau modèle économique devrait être trouvé à l'évidence.

On voit aisément que si l'on veut accélérer la transition énergétique, il convient de faire plutôt peser le poids de la fiscalité sur les motorisations les moins propres que le contraire. Ceci étant dit, cela pose à long terme la question de la mise en place d'une nouvelle fiscalité sur les transports, avec de nombreuses possibilités théoriques et pratiques : par exemple avec une tranche croissante dans le temps en fonction du km parcouru, quelle que soit la motorisation ; ou bien un impôt général ; une taxe sur l'énergie grise incorporée dans les véhicules, y compris électriques, serait aussi de nature à éviter de gaspiller le carbone dans la fabrication des batteries (mais par contre inciterait à émettre le carbone avec des véhicules embarquant peu de carbone à la fabrication mais en émettant beaucoup), de sur-dimensionner les batteries emportées par les véhicules et d'encourager la mise en place de filières de recyclage des batteries en fin de vie vers d'autres usages que les transports.

On peut donc envisager de commencer à taxer au début très modérément l'usage de l'électricité pour le véhicule électrique, pour, une fois la transition effectuée, faire en sorte que le véhicule électrique, comme les autres véhicules, paye sa juste part pour l'entretien des routes qu'il utilise, si possible au prorata du dommage qu'il provoque. Il faudrait aussi lui faire payer à terme la taxe carbone sur les GES gris immobilisés dans sa production et celle de sa batterie, et également le coût de son démantèlement. Bien sûr, aujourd'hui, étant très minoritaire, le véhicule électrique doit être favorisé, mais ces encouragements sont amenés à évoluer. Des études complémentaires en ce sens restent à mener.

4.5. Aperçu sur des politiques comportementales plus ciblées, leur potentiel et leur évaluation

4.5.1. Du point de vue des émissions de GES, réduire les vitesses routières interurbaines revient cher en termes de temps perdu et est moins efficace qu'une hausse de taxes sur les carburants

La vitesse influe sur les émissions de GES (principalement CO₂), mais aussi sur l'accidentologie, les émissions de polluants locaux ainsi que le bruit. Bien entendu, lorsque celle-ci est réduite, le temps de trajet s'allonge ce qui amène des inconvénients sur le plan de la valeur économique.

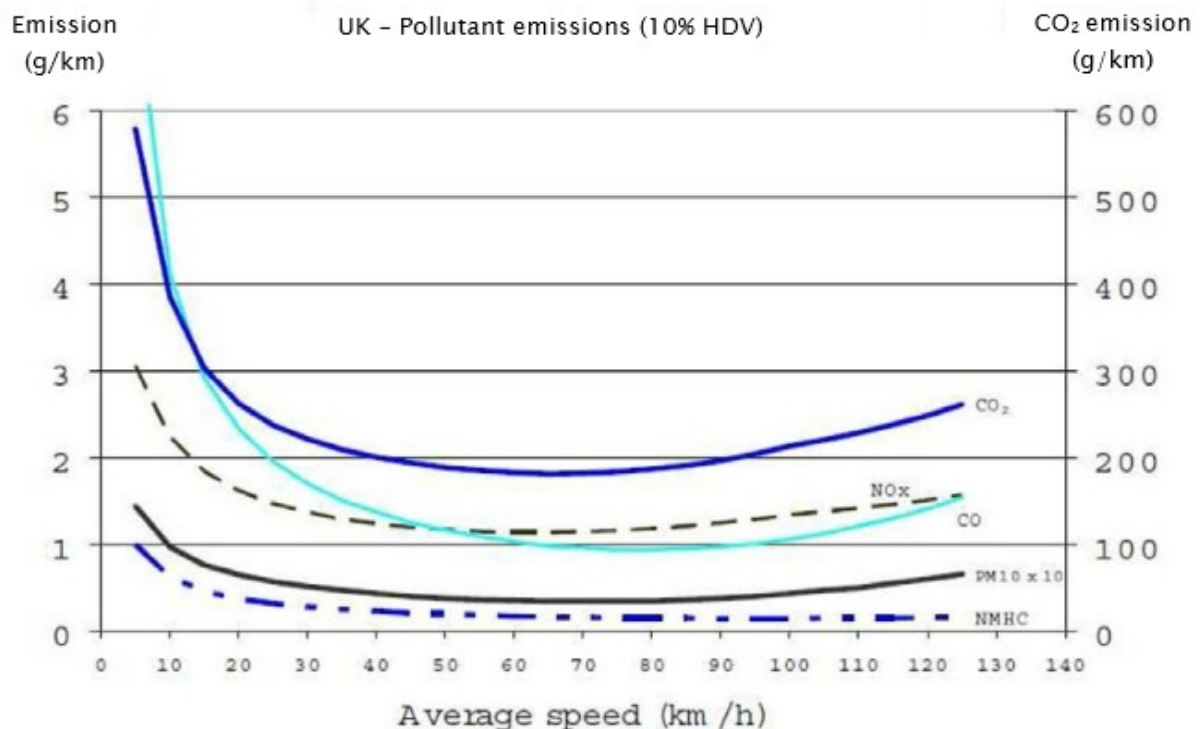
On notera qu'il n'y a pas identité entre vitesse limite et vitesse moyenne. Il peut même y avoir des cas où la réduction de la vitesse limite peut, en réduisant les risques d'accrochage notamment, faire augmenter les vitesses moyennes.

Le graphique de source néo-zélandaise suivant montre que jusqu'à une certaine vitesse, proche de 65 km/h la réduction de vitesse réduit aussi le CO₂ émis. En fait, en zone urbaine, ce sont souvent plus les fréquentes accélérations qui amènent à consommer du carburant que la vitesse en elle-même. Ces courbes peuvent bien sûr évoluer avec les motorisations hybrides, dont la finalité est justement d'éviter ces surconsommations en zone urbaine.

Plusieurs méthodes sont proposées pour procéder à des évaluations économiques de la vitesse optimale. Elles sont synthétisées dans le graphique ci-dessous, avec la méthode de la valorisation de capital humain perdu et celle de la disponibilité à payer individuelle ou collective.

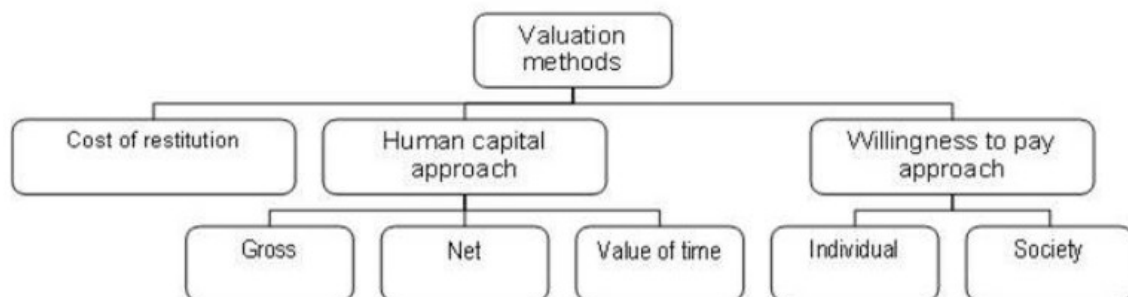
On peut déduire du graphique ci-dessous un ordre de grandeur de réduction des émissions unitaires de CO₂ par km de l'ordre de 0,9 % par km/h de vitesse moyenne, au-delà de 85 km/h environ. En dessous, l'effet semble assez faible, voire même aller dans le mauvais sens du point de vue des GES en tout cas (mais apporter des bénéfices de sécurité routière probablement).

Figure 7.5 UK pollutant emissions assuming 10% heavy vehicles by average speed



Source :Economic evaluation of the impact of safe speeds, literature review, 2012, Bill Frith, central laboratories, Nouvelle-Zélande
<http://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/505/docs/505.pdf>

Figure 4.1 Methods used historically for valuing safety



Source :Economic evaluation of the impact of safe speeds, literature review, 2012, Bill Frith, central laboratories, Nouvelle-Zélande
<http://www.nzta.govt.nz/assets/resources/research/reports/505/docs/505.pdf>

Examinons par exemple une baisse de vitesse sur autoroute de 130 à 120 km/h, et de 110 vers 100 km/h en cas de pluie. En appliquant le ratio plus haut, elle pourrait permettre de réduire les émissions de GES sur autoroute de 9 %, sous réserve que les vitesses moyennes décroissent également de 10 km/h, ce qui reste à vérifier. Compte tenu de quelques jours de congestion, ce n'est probablement pas toujours le cas, mais sur des autoroutes assez peu congestionnées comme en France on ne doit pas en être très éloigné.

Si l'on compte une valeur du temps de 15 euros/voyageur/heure et un taux d'occupation de 1,7, la perte de valeur du temps par km ressort à 1,6 centimes par véhicule-km. Sur une base de 6 litres au 100, la différence de prix des carburants TTC s'élève à 6 centimes par véhicule-km. Du point de vue du choix individuel, hors prise en compte des effets de sécurité, il fait probablement sens dans la très grande majorité des cas de circuler proche de la vitesse limite sur autoroute interurbaine.

L'impact de la vitesse sur la sécurité semble important. Par exemple, le Setra (aujourd'hui intégré dans le CEREMA) indique que, schématiquement, 10 % de réduction de la vitesse, c'est 10 % d'accidents matériels en moins, 20 % d'accidents corporels et 40 % de tués en moins⁹³.

La vitesse peut également présenter des effets sur les émissions de polluants atmosphériques locaux ou sur le bruit. Une limitation de vitesse a donc des effets sur les émissions, mais ce sont sans doute d'autres effets (accessibilité, consommation, coût, sécurité notamment) qui doivent guider les choix de limitation de vitesse.

4.5.2. Les TIC dans la gestion du trafic ou du stationnement peuvent contribuer un peu en urbain dense

L'utilisation des TIC (technologies de l'information de la communication) pour gérer le trafic peut réduire les émissions de GES liées aux transports en milieu urbain, notamment en réduisant le nombre de cycles freinage/accélération qui consomment de l'énergie, notamment par des dispositifs de type « onde verte »⁹⁴. La détection du nombre de véhicules en temps réel sur chaque axe peut aider aussi à prioriser les ondes vertes pour les axes où, à un moment donné, il y a le plus de véhicules.

Des systèmes de « boulevard intelligent » permettent aussi de détecter les places de stationnement libres et d'éviter aux conducteurs de rouler pour chercher une place (sans compter le co-bénéfice lié à la réduction du temps de trajet global).

L'estimation des gains potentiels dans un contexte français n'est pas aisée. Si une revue de littérature donne des éléments très disparates entre 5 % et 20 % de réduction de consommation, la situation française part souvent d'un certain degré d'équipement à la base. De plus les véhicules hybrides sont moins pénalisés par les cycles de freinage/accélération (moteur coupé à l'arrêt, stockage de l'énergie au freinage,...). Convenons par exemple de ne retenir que 3 % en milieu urbain pour les VL, tant que la motorisation passe essentiellement par des carburants. En périurbain, plus fluide, les gains sont probablement plus faibles, ainsi qu'en interurbain. Finalement ces 3 % ne concernent peut-être qu'environ 30 % des circulations des VL-km. Et il est possible qu'en facilitant les déplacements (ce qui crée des co-bénéfices), il y ait aussi un peu d'induction de trafic, limitant les gains à environ 2 % de 30 % soit environ 0,6 % des circulations VL en France et de leurs émissions.

Au niveau macroéconomique, le potentiel de réduction des GES permis par les TIC dans les transports existe probablement mais semble mal connu, et devrait faire l'objet de recherches complémentaires.

⁹³ Setra, 2006, Vitesse et mortalité, savoirs de base, page 2, <http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0004/Dtrf-0004058/DT4058.pdf>

⁹⁴ Technique de régulation routière : une voiture à la vitesse de l'onde verte ne rencontre plus de feu rouge une fois le premier feu rouge passé.

4.5.3. L' écoconduite

L'écoconduite est un comportement de conduite permettant à la fois de diminuer sa consommation et de réduire le risque d'accident. Il repose notamment sur l'utilisation des moteurs à bas régime et sur le développement des comportements d'anticipation.

Plusieurs entreprises, dont la Poste, ont formé leurs conducteurs aux techniques d'écoconduite. La Poste a même créé une structure qui réalise de la formation à l'écoconduite (Mobigreen). Elle annonce 15 % de réduction de consommation de carburant et d'émissions de GES et 10 % de réduction d'accidentologie. Dans son bilan de GES relatif à l'année 2011, La Poste indique avoir formé 70 000 collaborateurs et diminué ses consommations de carburant de 5 %.

De tels enseignements sont généralisables dans le cadre des formations professionnelles, de l'apprentissage de la conduite ou des stages obligatoires pour récupérer les points de permis de conduire perdus.

Les sites spécialisés indiquent que cette sensibilisation doit être périodiquement renouvelée.

4.5.4. Les limites des politiques d'investissement en vue du report modal, sauf dans les très grandes villes

On pourrait penser aux politiques d'investissement en vue du report modal pour réduire les émissions de GES. En effet, en moyenne, que l'on soit en urbain ou en interurbain, les émissions par voyageur-km sont en général bien plus faibles que celle de la voiture.

Les choses sont cependant plus complexes.

Dans le domaine interurbain, la commission « mobilité 21 »⁹⁵, constituée principalement d'élus de la Nation, s'est penchée en 2013 sur les possibilités de constructions de nouvelles lignes à grande vitesse. A l'exception (et encore dans une certaine mesure seulement) de Bordeaux-Toulouse et de quelques dessertes portuaires, elle a noté que les coûts de ces opérations n'étaient pas proportionnés aux avantages collectifs susceptibles d'en être tirés. La raison est que dans le cas français, les corridors où le niveau de trafic est suffisant pour justifier de telles lignes ont déjà été équipés, ou en voie de l'être avant 2018. Même « en se plaçant dans le cadre de la transition énergétique », ce « haut niveau d'équipement du territoire » l'a conduit à recommander une « réorientation des objectifs du SNIT », notamment vers des investissements capacitaires dans les nœuds et lignes saturées, avec comme première priorité « l'entretien et la modernisation des réseaux existants » notamment ferroviaires. Elle recommande aussi de « rehausser la qualité de service du système de transport ».

Si elle note que « tous les territoires doivent pouvoir bénéficier de transports performants », elle rappelle que « l'offre doit être adaptée aux situations pour être soutenable aux plans économique, social et environnemental ».

Une politique d'investissement dans les transports collectifs interurbains semble donc peu économique ; si elle était motivée uniquement par des émissions évitées (ce qui est certes incomplet et discutable), elle aboutirait à un prix élevé de la tCO₂, et ce

⁹⁵ Mobilité 21, pour un schéma national de mobilité durable, 2013 http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CM21_-_27_Juin_2013_vers2_9h38_sans_traits_de_coupe-2.pdf

d'autant plus que les projets entraînent des émissions de GES pendant la phase de construction.

Les travaux des commissions présidées par M. Duron ont également montré les limites des politiques d'offre en matière de trains classiques interurbains, amenant à redéployer les services, notamment ceux dont les remplissages étaient très faibles.

Compte tenu des émissions de GES par train peu dépendantes du nombre de voyageurs, le bilan GES de la circulation d'un train mal rempli est d'ailleurs souvent peu compétitif avec des solutions alternatives routières.

La consommation (en litres au 100 km) d'un train à traction thermique se situe ainsi à plus de 135 litres aux 100 km, l'autocar interurbain se situant vers 28 litres aux 100 km.

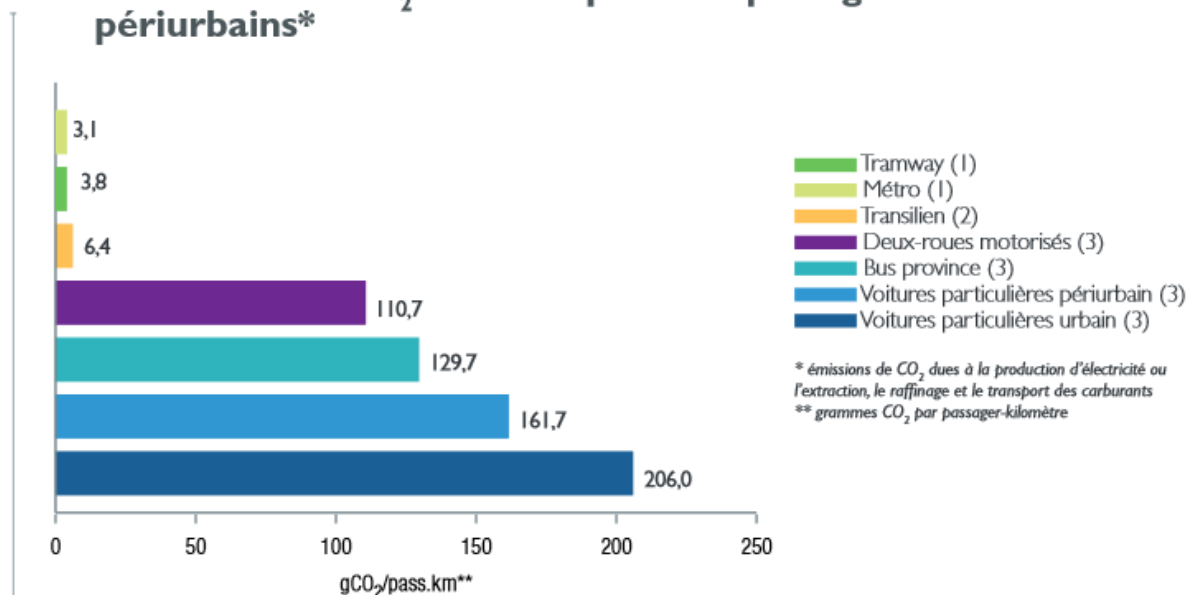
Lorsque le remplissage du train dépasse donc un peu plus 4 fois celui de la capacité d'un autocar (50 même en comptant un remplissage complet), soit environ 200 personnes, on peut espérer une économie de GES en exploitation. La moyenne du remplissage des trains régionaux (TER) en province est plutôt autour de 80 personnes. Il faudrait tenir compte des effets de report modal liés à des vitesses souvent moindres que le train, et d'un autre côté aussi des GES émis lors de la maintenance d'une infrastructure ferroviaire support peu utilisée, mais souvent, du seul point de vue du GES, la substitution modale des offres ferroviaires régionales, en dehors des régions et axes les plus denses, serait probablement en fait plutôt de nature à réduire les émissions de GES que le contraire.

Reste le sujet des transports collectifs urbains et périurbains. Si on compte 35 litres aux 100 km pour un bus, par rapport à un VL consommant par exemple 7 litres aux 100 km, on voit que le niveau de remplissage moyen de l'autobus doit dépasser environ 5 pour qu'il soit compétitif par rapport à l'usage de la voiture personnelle en termes d'émissions de GES. Et donc dans les zones de densité trop faible, ce remplissage minimum n'est pas nécessairement atteint.

Le rapprochement des voy-km des bus et tramways de province (7 875 millions par an en 2015, CCTN) des nombres de véhicules-km en province (800 millions par an, métros compris, desquels il convient de déduire environ 60 millions au titre des métros) aboutit à un remplissage moyen de 11 personnes par autobus et tramway en province (voyageur-km/véhicule-km). Comme celui des tramways est probablement plus élevé, le ratio de remplissage pour les autobus se situe donc vraisemblablement autour de 10. Ce qui est corroboré avec une moyenne de taux d'occupation des bus par place-kilomètre offerte de 3,9 % en 2009, pourtant dans des grandes villes, comme Lyon, Lille et Marseille. Si 10 est la moyenne, quand on ajoute une fréquence en heure creuse ou dans des zones de moindre densité, il est loin d'être évident qu'on dépasse le seuil de 5 énoncé ci-dessus pour un bilan GES positif.

Ce faible taux de remplissage est à mettre en relation avec le niveau émission de CO₂ par voyageur et par km à peine inférieur entre un bus de province moyen 129,7 gCO₂/voy.km et un VP en contexte périurbain (161,7 gCO₂/voy.km) ou urbain (206 gCO₂/voy.km) (France métropolitaine) (y compris phase amont). Si le nouveau bus ajouté (marginal) est un peu moins rempli que la moyenne (par exemple taux de remplissage de 30%), le ratio du bus province « marginal » passe à 169 gCO₂/voy.km, et il n'y aurait plus de gain par rapport aux VP en première approche.

D29. Émissions de CO₂ des transports de passagers urbains et périurbains*



Sources : (1) RATP - 2015 (2) SNCF - «Information CO₂ des prestations de transport - Méthodologie générale» - juin 2015
 (3) ADEME - Deloitte - «Etude sur les efficacités énergétiques et environnementales des modes de transports» - 2007 (données 2005)
 Champ : France métropolitaine (phase amont + phase utilisation)

Chiffres clés ADEME, climat air énergie 2015

<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/chiffres-cles-climat-air-energie-8705-bd.pdf>

Cette analyse est évidemment très sommaire, mais elle montre que dans un contexte de taux d'équipement élevé en transports collectifs urbains comme en France, la multiplication de l'offre (en lignes et en fréquence) n'est pas forcément une politique toujours pertinente, si on l'analysait, ce qui serait abusif, du seul point de vue des GES. D'autres effets jouent : décongestion routière, réduction de la pollution de l'air, du bruit, de l'insécurité routière. Dans les grandes villes le poids de la congestion routière dans le bilan socio-économique est souvent très important.

Ainsi, en Île-de-France. Dans cette région particulièrement dense, le remplissage moyen des autobus se monte à environ 17 personnes soit le rapport de 2 016 millions de voyageurs.km divisé par 291 millions de véhicules.km en 2015 (d'après sources CCTN, RATP, Optile).

Il faut bien sûr regarder chaque projet au cas par cas, et les outils d'évaluation socio-économiques permettent d'examiner à quel prix ressort la tonne de CO₂ évitée, une fois les autres co-bénéfices ajoutés (ou retirés selon leur signe). Il ne semble en particulier pas raisonnable d'envisager des projets ne présentant pas des niveaux raisonnables de rentabilité socio-économique à un seuil de 100 à 150 euros par tCO₂ environ.⁹⁶

⁹⁶ Comparaison Certu Keolis, Sytral, 2009 http://www.canol.fr/_media/comparaisons-certu-keolis.pdf

4.5.5. Le levier de la baisse des prix des transports collectifs s'analyse le plus souvent par d'autres considérations que les GES

Pour renforcer l'usage des transports collectifs (TC) terrestres urbains et interurbains, on pourrait penser à en baisser le prix. Ceci pourrait en augmenter la clientèle, et reporter des voyageurs des modes aériens et routiers vers les TC terrestres, en général moins émissifs de GES par voyageur-km parcouru.

Ce type de politique présente un coût public pour le contribuable, car en général les recettes supplémentaires liées aux voyageurs supplémentaires ne compensent pas les pertes de recettes par baisse de prix. La question est donc de voir si ce coût reste raisonnable ou pas.

On peut examiner le ratio de la dépense publique supplémentaire par tCO₂ évitée, en tenant compte que le report modal produit de la décongestion en co-bénéfice. Dans ce cas le coût est moindre.

Le bilan peut être différent, selon que l'on considère des déplacements interurbains (en première approche baisser le prix du TGV ou du TET), les TER ou les TCU de l'Île-de-France ou bien les TCU d'une grande ville de province.

Par exemple, la DG Trésor a mené une analyse⁹⁷ de ce type en Île-de-France. Elle conclut qu'« une augmentation unilatérale des prix des transports collectifs (franciliens) est susceptible de dégrader le bien-être collectif ».

Cette conclusion vient essentiellement de l'importance des coûts marginaux de congestion en Île-de-France, reprenant des études fines du LVMT de l'école des ponts. Toutefois le résultat est sensible aux élasticités prix retenues. La valeur socio-économique des émissions de GES susceptibles d'être réduites par une mesure de baisse de prix des TC pèse en fait assez peu dans la balance.

4.5.6. Le péage urbain, outil souvent intéressant pour la décongestion des centre-villes, semble n'apporter rien ou très peu à la réduction des émissions de GES

Le péage urbain dans une zone centrale peut être un outil intéressant de décongestion des centre-villes. En revanche, dans une optique de réduction des émissions de GES, il ne constitue pas un outil intéressant. Certes, il induit un report modal favorable et réduit les trafics routiers dans la zone à péage et la fluidifie. Mais, il amène une partie des conducteurs automobiles à contourner la zone à péage, et de ce fait à allonger leurs trajets.

Par exemple, à Londres, l'effet de la « congestion charge » (11,5£ pour le droit de circuler dans la zone centrale de Londres assujettie à ce péage entre 7h et 18h en semaine) ne serait d'après TfL (« transport for London ») que de l'ordre d'environ 1 % du CO₂ émis par le secteur transport de l'ensemble de la ville⁹⁸. Des experts indépendants n'ont pour leur part pas vu d'effet du tout. De toute façon, la zone à péage présente une étendue très faible par rapport à l'ensemble de la ville. Certes cet effet de la « congestion charge » est de 16 % dans la zone à péage proprement dite,

⁹⁷ Opportunité économique d'une hausse de prix dans les TC franciliens, DG Trésor, Benjamin Bureau, document de travail, novembre 2011, <https://www.tresor.economie.gouv.fr/File/332653>

⁹⁸ Case study, London's congestion charge reduces CO₂ by 16 %, TfL, 2011, http://www.c40.org/case_studies/londons-congestion-charge-cuts-co2-emissions-by-16

mais le sujet du changement climatique étant global, on ne peut pas raisonner par zone.

On notera qu'une gratuité est accordée aux véhicules électriques, à de nombreux véhicules hybrides rechargeables, et aux véhicules émettant moins de 75 gCO₂/km et conforme à la norme de pollution locale de l'air Euro 5, ce qui n'inclut à ce stade aucun véhicule à motorisation à combustion interne. Il est possible que cette mesure spécifique puisse constituer un encouragement à l'achat de véhicules à très faibles émissions pour des utilisateurs fréquents de la zone à péage.

4.5.7. Le levier des politiques de stationnement peut apporter des réductions des émissions urbaines par une vérité des prix

En circulation urbaine notamment, le stationnement est une composante essentielle de la chaîne de valeur du déplacement. Par exemple, en centre-ville de Paris, le prix du stationnement à la journée pour les utilisateurs de parkings concédés peut atteindre et dépasser 10 euros. Alors que pour un déplacement type de 10 km, même en tenant compte de l'amortissement du véhicule, le coût de revient reste de l'ordre de 2 euros par trajet, soit 4 euros l'aller-retour. En proche banlieue, ou dans des grandes villes de province, les prix sont plus bas, l'espace urbain étant moins rare, plutôt autour de 3 euros la journée, avec de très fortes variations locales.

La disponibilité d'un stationnement gratuit (ou peu cher) influe très significativement sur le partage modal. Le Cerema (ex-Certu) a par exemple simulé l'impact dans 3 villes de province en France d'un durcissement des contraintes de stationnement sur le partage modal, à offre constante en TC, en corrigeant de l'effet du niveau de la desserte TC⁹⁹. Les résultats sont très proches d'une ville à l'autre, avec une baisse d'usage de la VP de l'ordre de 12 % dans le périmètre spatial considéré.

	VP	TC	2 Roues	Marche
Lille	-12 %	+10 %	=	+1,5 %
Lyon	-12 %	+14 %	-0,6 %	-1,3 %
Montpellier	-12 %	+12 %	-2,0 %	+2,6 %

Illustration 53: Effets potentiels sur le partage modal de l'augmentation du niveau de contrainte de stationnement de « moyen » à « fort » à offre TC constante – cas de Lille, Lyon et Montpellier

⁹⁹ Contraintes de stationnement et pratiques modales, méthodologie et étude des cas de Lille, Lyon, et Montpellier, Certu, 2009, http://www.cergyponoise.fr/upload/docs/application/pdf/2013-08/contraintes_de_stationnement_et_pratiques_modales.pdf

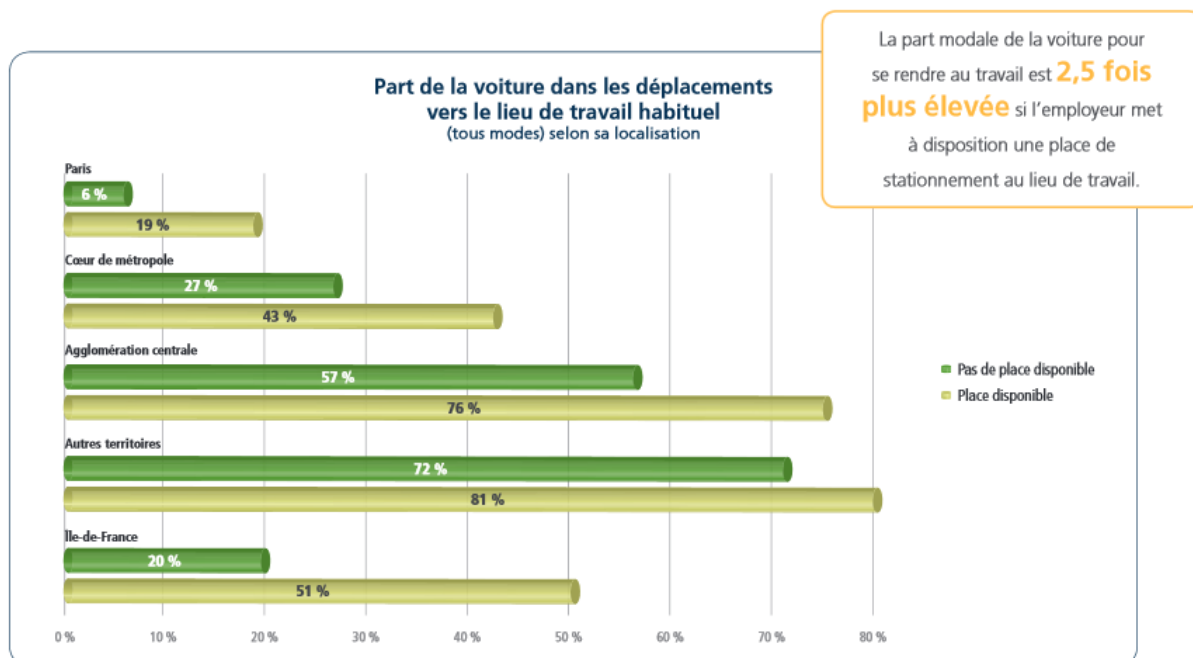
		VP	TC	2 Roues	Marche	Autre	Effectifs dépla.	Effectifs bruts
Niveau de contrainte	Fort	65 %	30 %	3,0 %	1,5 %	0,6 %	160 620	1 899
	Moyen	84 %	10 %	2,9 %	2,2 %	0,6 %	72 531	983
	Faible	92 %	4 %	1,1 %	1,5 %	1,4 %	304 053	3 983
Ensemble		83 %	12 %	1,9 %	1,6 %	1,1 %	552 564	7 063

Illustration 42: Lyon : partage modal des déplacements supérieurs à 2 km par type de contrainte de stationnement

Source : *Contraintes de stationnement et pratiques modales, méthodologie et étude des cas de Lille, Lyon, et Montpellier, Certu, 2009*,
http://www.cergyponoise.fr/upload/docs/application/pdf/2013-08/contraintes_de_stationnement_et_pratiques_modales.pdf

Par exemple, dans le cas de Lyon, on peut constater les différences importantes de part modale.

Une enquête de l'Omnil¹⁰⁰ aboutit, en Île-de-France, à constater un choix modal 2,5 fois plus probable en faveur de la voiture si l'employeur met à disposition une place de stationnement.



Source : *Le stationnement, un levier majeur des politiques de déplacement*, Omnil, 2015, http://www.omnil.fr/IMG/pdf/fiche_egt_stationnement_mel.pdf

¹⁰⁰ Le stationnement, un levier majeur des politiques de déplacement, Omnil, 2015, http://www.omnil.fr/IMG/pdf/fiche_egt_stationnement_mel.pdf

On voit aussi que le taux de motorisation en cœur de métropole est largement corrélé avec la disponibilité d'un emplacement à domicile. L'effet est très marqué dans Paris intra-muros, nettement moins en périphérie, mais il subsiste globalement un ratio de 1:2 selon qu'un emplacement est disponible ou pas.

	Taux de motorisation des ménages	
	Emplacement(s) disponible(s)	Pas d'emplacement disponible
Paris	81 %	23 %
Cœur de métropole	86 %	47 %
Agglomération centrale	92 %	66 %
Autres territoires	94 %	73 %
Île-de-France	88 %	43 %

Source : Insee 2010.

Source : *Le stationnement, un levier majeur des politiques de déplacement*, Omnil, 2015, http://www.omnil.fr/IMG/pdf/fiche_egt_stationnement_mel.pdf

À l'étranger, on voit aussi des politiques de prix de stationnement modulées selon le facteur d'émission des véhicules, comme sur le barème suivant d'un quartier de Londres.

Band	CO ₂ g/km	Impact of changes to current first Permit Charge	Impact of changes to 2nd & subsequent Permit Charge
A	Up to 100	No charge	No Charge
B	101-120	50% reduction	50% increase on the 1st permit
C	121-150 (+Pre-2001 cars less than 1549cc)	10% reduction	50% increase on the 1st permit
D	151-165	10% increase	50% increase on the 1st permit
E	166-185 (+Pre-2001 cars 1549cc – 3000cc)	30% increase	50% increase on the 1st permit
F	186-224	50% increase	50% increase on the 1st permit
G	Over 225 (+Pre-2001 cars greater than 3000cc)	200% increase	50% increase on the 1st permit

Source : *Changes to parking charges based on CO₂ emissions, Richmond upon Thames, London,*

http://www.richmond.gov.uk/parking_chrges_consultation1.pdf

La mise en œuvre de politiques de raréfaction ou de renchérissement du stationnement, notamment pour les véhicules les plus émissifs en GES, serait de nature à inciter au report modal ou à l'acquisition de véhicules moins émissifs. Cela concernerait surtout les personnes résidant ou travaillant dans les centres des grandes villes, l'espace de voirie pour le stationnement n'étant pas intrinsèquement rare ailleurs.

Une simulation simple concernant trois cas en Île-de-France montre que le prix pratiqué par le stationnement, même en parking public, est très nettement inférieur (60 % de moins) à celui qui correspondrait au même niveau de rente foncière que pour les logements. Bien entendu, les résidents bénéficient en outre de prix encore nettement plus bas.

A très long terme, si l'on fait l'hypothèse conventionnelle inspirée de la compétition d'usage d'un modèle de type Alonso-Von Thuenen, que l'espace urbain est fongible entre divers usages, on pourrait alors en déduire une significative sous-tarification de l'espace de stationnement par rapport à celui utilisé pour les logements, bureaux ou commerces (en centre-ville en Île-de-France la valeur de la rente foncière doit

l'emporter sur la différence de coûts des équipements entre un logement et un parking).

Ce qui pose la question de l'usage d'une grande part du foncier urbain pour un usage peu tarifé, indépendamment même des questions d'émissions de GES. En pratique, cela amène les non occupants de places de stationnement, souvent davantage utilisateurs des TC, à subventionner de fait ceux qui consomment du stationnement, et roulent davantage en voiture. Le montant de cette subvention peut être estimé en première approche à 12 milliards d'euros par an. Avec peut-être autant en province ou un peu moins, on arrive à un ordre de grandeur total de 20 milliards d'euros par an, ce qui est de l'ordre des subventions monétaires apportées aux TCU.

En outre, d'autres usages de l'espace de voirie urbain peuvent être envisagés que le stationnement (commerces, espaces récréatifs, espaces pour les piétons ou les cyclistes,...).

Intramuros	Petite couronne	Grande couronne, villes	
6000	3500	2500	prix m2 logement euros
2000	1800	1500	coût de construction par m2 logement
4000	1700	1000	rente foncière par m2 logement
6	4	2	niveaux
24000	6800	2000	rente foncière par m2 sol
1,5	1,5	1,5	Coefficient pour parties communes, cours,...
16000	4533	1333	rente foncière par m2 sol
4%	5%	6%	rendement
640	227	80	valeur locative annuelle rente foncière m2 sol
1,8	0,6	0,2	valeur locative annuelle rente foncière m2 sol
12,5	12,5	12,5	surface place parking 5*2,5 m2
1,3	1,3	1,3	Coefficient pour circulations techniques
16,3	16,3	16,3	surface place parking au sol yc circulations techniques m2
28	10	4	Loyer journalier équivalent surface d'une place parking; euros
10	3	2	Loyer journalier constaté en parc public pour une place parking; euros
-65%	-70%	-44%	Sous-tarification estimée

Total	Intramuros	Petite couronne	Grande couronne, villes	
	100	675	2000	M m2 sol
	10%	5%	3%	part en stationnement
	10	34	60	M m2 sol stationnement
	18	7	2	subvention implicite par place et par jour

	1,1	0,4	0,1	subvention implicite par m2 et par jour
12	4,2	5,4	2,1	subvention implicite en milliards d'euros par an

Exemple de données – Source, mission

Il n'y aurait a priori en la matière pas de perte de bien-être économique dans la mesure où il s'agirait de rétablir une politique de prix de premier rang, même si l'hypothèse de fongibilité effectuée ne vaut qu'à très long terme en cas d'opération profonde de réaménagement urbain.

Quel pourrait être l'impact sur les émissions de GES ? On peut constater que le levier n'aurait probablement que très peu d'effet dans l'espace rural et les petites villes, où l'espace est abondant. Il concerne également assez peu les déplacements interurbains, sauf de ville centre à ville centre.

L'assiette ne dépasse donc pas celle des déplacements urbains à destination ou depuis les centre-villes, soit seulement le quart des déplacements de la vie quotidienne (60 % du total environ), donc 15 % des déplacements. Si l'on se base sur la simulation du Cerema, l'effet sur la demande automobile pourrait être de 12 % pour les déplacements concernés, soit un total de 1,8 % sur l'ensemble des voyageurs-km VL en France.

Une large partie du report se fait sur les TC, dont une grande partie vers des bus. Si le report se fait à offre bus constante, il n'y a pas d'émissions de CO₂ en plus. La part se reportant vers des modes électrifiés, ou vers la marche à pied ou le vélo, correspond à une réelle baisse d'émissions. Si on considère que parmi ces reports, un tiers irait aux modes très peu émetteurs, et que pour les deux tiers se reportant vers le bus, seul un tiers de ces deux tiers nécessiterait un renfort en fréquence, réduisant quand même de 50 % (mis IDF province) environ les émissions, on arriverait à une baisse de 1,6 % des émissions de l'ensemble des voyageurs-km VL en France.

4.5.8. Les voies rapides urbaines et interurbaines réservées aux véhicules peu émissifs ou partagés peuvent apporter des baisses d'émissions urbaines et périurbaines

Les pouvoirs publics, en général les collectivités locales, contrôlent dans une large mesure l'utilisation de l'espace de voirie. Aujourd'hui, en ville, de nombreux couloirs affectés aux bus (ainsi qu'aux taxis et aux véhicules prioritaires) permettent d'augmenter les vitesses moyennes de circulation des autobus en ville, et donc de renforcer leur attractivité.

Cependant, on n'est probablement pas allé au bout de ce qui serait possible en la matière. Des voies peuvent être réservées sur une grande artère urbaine non seulement aux autobus, mais aussi aux véhicules à occupation multiple (VOM). C'est le cas de 4 000 km environ en Amérique du Nord ou en Australie et en Nouvelle-Zélande, ainsi que dans plusieurs villes d'Europe (Madrid en Espagne, Leeds, Bristol au Royaume-Uni, Linz en Autriche, Stockholm en Suède, Trondheim, Oslo, Kristiansand en Norvège) et récemment du monde émergent (Jakarta en Indonésie, Shenzhen en Chine). On trouvera ci-dessous une illustration du cas de Madrid.

En République de Corée (Sud), ce même type de système est utilisé également en usage interurbain sur les principales autoroutes du pays, assurant aux autobus

urbains, mais aussi aux autocars interurbains (ainsi que taxis et véhicules prioritaires) une excellente vitesse moyenne de circulation avec peu d'aléas, donc un haut niveau de ponctualité.



Source : HOV lanes, evidence on performance, Leeds university

http://www.its.leeds.ac.uk/projects/konsult/private/level2/instruments/instrument029/12_029c.htm

Le système de Leeds (agglomération de 2,5 millions d'habitants) est plus basique, et ne concerne qu'une voie.



Système de Leeds - Source :HOV lanes, evidence on performance, Leeds university

http://www.its.leeds.ac.uk/projects/konsult/private/level2/instruments/instrument029/12_029c.htm

Les systèmes de détection automatique du nombre de passagers dépassent désormais une fiabilité de 95 % (cf. par exemple test du système Xerox financé par l'ADEME).

Bien entendu, le système n'est intéressant que si la route est congestionnée au moins aux heures de pointe, sinon l'avantage conféré est faible. Il convient aussi que la voie

rapide comporte des réserves de capacité par rapport aux autobus de manière à ne pas en réduire la vitesse moyenne. Il convient aussi de veiller à ce que les temps de trajet des voies « standard » restent acceptables. La voie VOM d'Amsterdam a été ainsi supprimée suite à un recours judiciaire lié au non respect de ce critère. Dans certains cas, cela peut amener à donner accès à la voie réservée au seuil de 2 personnes, dans d'autres au seuil de 3.

Les effets positifs de la présence de véhicules à occupation multiple et d'autobus se renforcent mutuellement. Ainsi, pour l'utilisateur passager du covoiturage le matin, l'existence d'un service d'autobus lui garantit un retour possible à peu de frais le soir et le libère donc du risque de ne pas trouver de solution de covoiturage au retour. Pour les collectivités, si le covoiturage peut les aider à maîtriser leurs dépenses d'exploitation, c'est également avantageux. De plus, les deux marchés du bus et du covoiturage urbain ne se recoupent que partiellement, les utilisateurs pouvant se différencier par rapport à leur propension à accepter chacune des deux offres d'une part, mais aussi pour des raisons géographiques d'autre part.

Certaines voies réservées sont réversibles selon le sens principal de circulation, donc dans un sens le matin et dans l'autre le soir. Une séparation physique permet d'éviter des conséquences négatives en matière d'accidentologie.

Dans de nombreux cas, l'usage des voies réservées est également autorisé aux véhicules à zéro émissions (électrique, hybride rechargeable), même à un seul occupant, ce qui encourage la possession de ce type de véhicules en conférant à leurs utilisateurs un avantage en temps significatif si la voie réservée se situe sur leur trajet. Cela suppose l'identification des véhicules autorisés du fait de leurs faibles émissions par une vignette appropriée.

Si le système est utilisé dans sa zone de pertinence, et correctement paramétré, il peut présenter un bilan gagnant pour tous : pour les conducteurs de la voie rapide qui gagnent en temps, pour les passagers de la voie rapide qui gagnent aussi en temps par rapport à une conduite seul, ou bien avec un système de TCU si la géographie de leurs trajets ne le rend pas pratique (correspondances complexes, mauvaises fréquences,...), mais aussi dans une certaine mesure les usagers de la voie non réservée qui bénéficient de la décongestion globale de l'axe, des opérateurs de TCU et de leurs AO qui évitent des dépenses supplémentaires, ainsi que pour l'environnement (GES, pollution locale, bruit) qui bénéficie de la réduction globale du nombre de véhicules. À part les études et la mise en place d'un séparateur physique, et d'un système de contrôle sanction, les coûts publics sont minimaux et bien inférieurs à ceux d'un TC lourd.

A Madrid, l'ouverture des réservées bus et VOM a amené sur le trajet concerné à la fois une hausse de la part des véhicules occupés à deux personnes et plus (passé de 30 % à 40%) et une augmentation de la fréquentation des bus de 40 % à la pointe menant à une part modale passant de 17 à 26 %, quand celle de la VP passait de 56 à 48 %. Le taux d'occupation VP est passé de 1,36 à 1,67 en pointe vers le centre le matin. Des résultats assez similaires ont été constatés à Leeds ou Trondheim.

Il convient de passer de l'analyse de cas types à des ordres de grandeur d'impact global potentiel sur les émissions de GES.

Le cas de Madrid montre, à l'heure de pointe du matin, entre 1991 (avant) et 1997 (après) une baisse des émissions de CO₂ unitaires par passager de l'ordre de 20 % sur l'axe considéré. Il est vraisemblable que la diminution soit plus faible à l'heure de pointe du soir, moins marquée, supposons 15 %. Enfin, hors pointe, ainsi que le week-

end, l'effet est probablement assez faible, puisqu'il n'y a pas d'avantage temps marqué. On arrive ainsi probablement à une baisse probable de l'ordre 10 % des émissions de CO₂ sur le corridor en moyenne. Il s'agit d'un corridor où ont été implémentés simultanément les fonctionnalités bus et VOM. Dans un contexte où les bus bénéficieraient déjà d'une voie réservée, l'avantage serait sûrement moindre.

Comme il faut que la congestion soit significative pour que le système présente un intérêt, on voit qu'il n'est pas adapté au milieu rural ni aux petites et moyennes villes, et ne devrait concerner peut-être au maximum qu'un tiers de la mobilité quotidienne. A titre d'exemple de calcul, si l'effet est de 5 %, sur une assiette de 0,33 x 0,6 (car hors interurbain en première approche, sauf en IDF et sur A7 A9 probablement), on arriverait à une réduction globale de l'ordre de 1 % des émissions transport VL au plan national.

À terme, lorsque les véhicules seront pour la plupart à faible émissions, des voies réservées au covoiturage restent intéressantes, car elles permettent de réduire la taille du parc, donc la congestion et les émissions liées au carbone gris nécessaire à la fabrication des véhicules.

4.5.9. Le vélo, le vélo à assistance électrique, les trottinettes électriques pourraient apporter également des solutions de mobilité sobres en GES jusqu'à 10 ou 15 km

La promotion de l'usage du vélo peut également contribuer à la baisse des émissions de GES. L'objectif est alors de substituer le vélo à des modes émissifs notamment la VP. Les distances parcourues en vélo restent faibles en général, ce qui limite la portée de cette approche. Toutefois, le développement des vélos à assistance électrique (VAE) peut augmenter la portée réaliste des déplacements en vélo, vers 15 km environ, et les rendre davantage compatible avec une topographie comportant quelques rampes.

À noter toutefois qu'il y a un peu d'énergie grise, et donc de GES gris dans la batterie du VAE, mais nettement moins que dans un véhicule électrique et même un véhicule hybride rechargeable.

À cet égard, l'agence fédérale environnementale allemande cite, sur la base d'une étude de la technische Universität (université technique) de Dresde¹⁰¹, un panel de mesures pouvant contribuer à développer l'usage du vélo, dans un scénario A. Un scénario B comprend des mesures plus volontaristes encore, mais touchant plutôt d'autres modes.

¹⁰¹ Potential of cycling to reduce emissions in road transport, federal environmental agency, Allemagne, 2013 <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4451-0.pdf>

Table 1: Overview of measures in Scenario A

	Scenario A Promotion of Cycling Transport as a System
Infrastructure	Cycling networks without gaps
	Cycling facilities according to the state-of-the-practice
	Route signage
	Cycle parking infrastructure
	Combination with PT (bike rental scheme, bicycles in trains)
	Special measures (bike stations/mobility centres, cycle tracks, promotion and consideration of pedelecs)
Information	Mobility education and mobility advising
	Mobility management
	Advertising and information campaigns
	Information and training offers for decision-makers and professionals
	Promotion of a dialogue between networks
Pricing Policy	Budgets for hard and soft measures in cycling transport
	Tax and operational incentives for cycle use
	Government promotions programmes for cycling transport
Legal	Obligatory parking racks for cyclists
	Special consideration for the safety needs of non-motorised road users, simultaneous consideration of travel comfort and standards
	Bicycle streets, removal of entrance bans, etc.
	Cyclist-friendly traffic lights
Other (e.g. Organisation and Operations)	Quality management, traffic safety audits and analyses
	Service offers
	Cycling officer and cycling transport working group
	Cycling and pedestrian guidance at construction sites
	Cleaning and winter maintenance of cycling facilities

Source : *Potential of cycling to reduce emissions in road transport, federal environmental agency, Allemagne, 2013*

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4451-0.pdf>

À la base, si en Allemagne, le vélo correspondait à 11 % des trajets en 2008, il ne fait que 3,4 % des voyageurs-km. La topographie influe largement sur la demande. Si, en Allemagne, 80 % des personnes interrogées disent qu'un trajet à vélo de 5 km sur terrain plat est faisable, la part des réponses positives chute énormément lorsqu'il y a des pentes.

L'étude identifie un potentiel où la moitié des déplacements se ferait à vélo, soit 13 % des voyageurs-km. Les émissions de CO₂ transports pourraient ainsi être réduites de 11,1 %. Elle note que la grande majorité de la population allemande vit en milieu rural et dans des petites villes.

ITDP et University of California Davis¹⁰², pour le compte de l'union cycliste internationale, ECF et BPSA, aboutit également à un potentiel de réduction des émissions de CO₂ transports (voyageurs urbains) de 11 %. Une part importante mais

¹⁰² A global high shift cycling scenario, ITDP et UC Davis institute for transport studies, 2015
https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2015/11/A-Global-High-Shift-Cycling-Scenario_Nov-2015.pdf

non majoritaire de l'effet escompté est liée au développement des vélos à assistance électrique (VAE).

En France, selon la CCTN (rapport 2015) 2,7 % des déplacements locaux en semaine seraient effectués en vélo, avec un pic de 7,6 % à Strasbourg (2009) ou 7,5 % à La Rochelle (2011). Le parc de vélo d'adultes serait de 26,7 millions en 2008, donc couvrirait une grande part de la population, la faible part modale du vélo y serait donc davantage liée à l'usage qu'à la possession.

Pour la France, ITDP voit une part modale en 2050 de l'ensemble vélo et VAE un peu inférieure à 20 % (contre moins de 5 % actuellement), soit un peu en-dessous du niveau actuel du Danemark ou des Pays-bas.

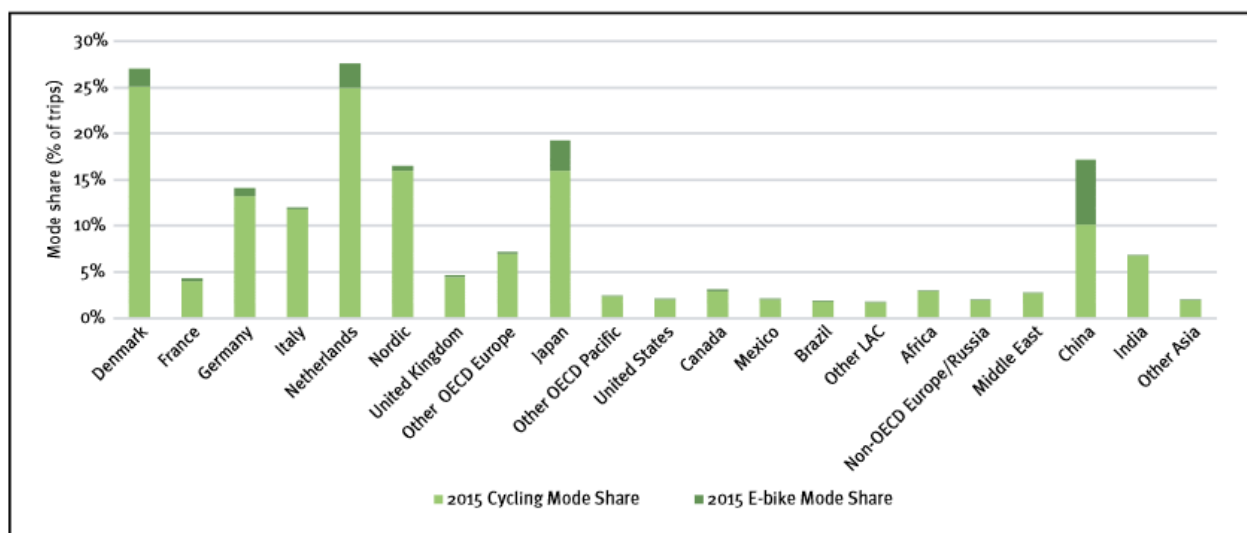


Figure 2. Aggregate, adjusted Baseline mode shares for bicycles and e-bikes, 2015.

Source ITDP, situation 2015, part dans les déplacements – source, A global high shift cycling scenario, ITDP et UC Davis institute for transport studies, 2015

https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2015/11/A-Global-High-Shift-Cycling-Scenario_Nov-2015.pdf

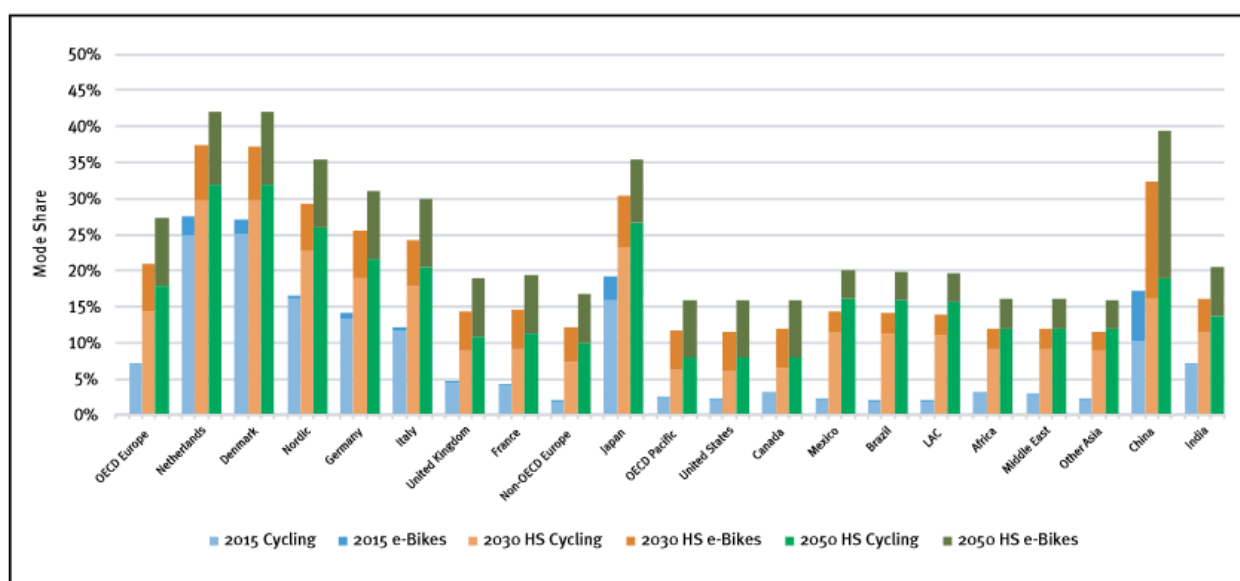


Figure 11. Mode shares to 2050, High Shift Cycling Scenario

Perspectives ITDP, part dans les déplacements – source, A global high shift cycling scenario, ITDP et UC Davis institute for transport studies, 2015

L'étude suppose la mise en place de diverses formes de limitation du trafic automobile (par le stationnement, les voies réservées, les interdictions, les taxations,...), et d'un autre côté le développement de couloirs réservés ou protégés, pistes cyclables, les ondes vertes,...

Elle note par exemple que la part modale du vélo est passée à Séville de 0,5 % à 7 % de 2006 à 2012, soit en 6 ans, grâce notamment à 130 km de voies protégées pour vélos et une offre de vélo en libre service. Elle regarde ensuite comment pourraient s'y substituer le vélo, ainsi que le VAE, dans différentes gammes de distances.

ITDP voit dans le développement des vélos un gisement d'économies par rapport au besoin de construction routière, surtout dans les pays en développement, ainsi que des économies sur les achats et l'usage des voitures, soit un total de 35 000 milliards de dollars des États-unis dans le monde d'ici 2050.

L'intérêt de développer une offre pour le vélo et le VAE est de pouvoir répondre de manière sobre en GES aux besoins de mobilité qui seraient gênés par les mesures de limitation automobile. Le vélo ne peut répondre à toutes les gammes de distance, mais peut répondre aux tranches les plus basses. Avec le VAE, les tranches de distance atteignables sont plus importantes, et le cas chinois montre que cet outil peut avoir du potentiel, à condition d'être protégé par rapport aux circulations automobiles. Le cas chinois d'ailleurs rappelle que les accidents ont souvent lieu aux intersections.

Par rapport aux autres chapitres, il est important de ne pas effectuer de doubles compte avec des mesures de limitation du trafic automobile. Ceci dit, ces mesures seront probablement rendues plus acceptables si des alternatives sont proposées.

Peut-être faut-il aussi inclure d'autres formes de mobilité légères à roues, depuis la trottinette à la trottinette électrique, voire les diverses formes de petits dispositifs électriques fonctionnant avec un gyroscope. Leur marché potentiel ne se superpose pas avec celui du vélo ou du VAE .

Il y a peu de données en la matière, mais il semble par exemple que la trottinette électrique pliable, du fait de son faible encombrement dans les transports collectifs, se prête particulièrement bien à assurer le parcours des derniers kilomètres complémentaires aux transports collectifs, qu'une partie des utilisateurs n'aurait pas voulu effectuer ni en vélo ni en VAE.

La motorisation ou l'assistance électrique réduit l'effort physique à effectuer, certes au détriment des avantages sanitaires, mais évite ce qui peut également être un frein à l'usage, par exemple la nécessité de se changer et de prendre une douche à l'arrivée au bureau.

Au total, en excluant les doubles comptes avec d'autres chapitres, on pourrait retenir un potentiel de 6 %, surtout en milieu urbain, en cas de politique très volontariste, se traduisant en 2 % des émissions VL au plan national. Les coûts devraient être assez faibles, s'agissant essentiellement d'améliorer le partage de la voirie.

4.5.10. Les impacts GES limités des nouveaux modes de transport interurbains (autocars et covoiturage interurbains)

Ces dernières années ont vu se développer des nouvelles offres de transport interurbain en France. Il s'agit du covoiturage interurbain, dont le site le plus important est BlaBlaCar. La loi n°2015-990 du 6 août 2015 pour la croissance, l'activité et l'égalité des chances a également autorisé de plein droit les autocars interurbains à plus de 100 km. En deçà de 100 km, les autorités organisatrices des services existants peuvent demander des interdictions ou limitations des offres d'autocar librement organisés, qui sont soumis à avis conforme de l'Arafer.

Ces deux formes d'offres se sont rapidement développées, et le développement reste en cours. L'Arafer publie des volumes de trafic en autocars librement organisés. Ainsi au 1^{er} trimestre 2016, l'Arafer compte 1 081 300 passagers transportés, sur une distance moyenne de 346 km, en croissance de 69 % par rapport au trimestre précédent. Ceci correspond à 0,37 milliards de voy-km sur le trimestre, donc environ 1,5 milliards de voy-km en base annuelle, soit environ 0,7 % du transport de voyageurs à longue distance, estimé à 219,5 milliards de voyageurs France-France en 2015. Mais le mode semble encore en forte croissance.

BlaBlaCar ne publie pas de données concernant les nombres de voyageurs qui utilisent son service. Une estimation de l'ADEME situe à 13 millions de trajets en 2015, sur 320 km en moyenne soit 4,2 milliards de voyageurs-km en base annuelle, ou 1,9 % de la mobilité longue distance France-France en 2015. Avec une hypothèse de croissance de 40 % par an, on arrive pour 2016 à 1 % pour l'autocar longue distance librement organisé et 2,7 % pour le covoiturage interurbain soit 3,7 % de la mobilité à longue distance.¹⁰³

Ces deux modes étant en croissance, leur part modale en situation stabilisée sera probablement plus élevée. Par exemple, en Espagne, où l'autocar est autorisé depuis longtemps (à la différence de l'Allemagne), et où les autoroutes sont peu congestionnées (à la différence de la Grande-Bretagne), la part modale de l'autocar interurbain serait autour de 14 % en 2007. De plus, les péages autoroutiers français (qui coûtent environ 6 centimes par VL-km) rendent plus intéressants l'usage de l'autocar qu'en Espagne où la grande majorité des autoroutes est gratuite.

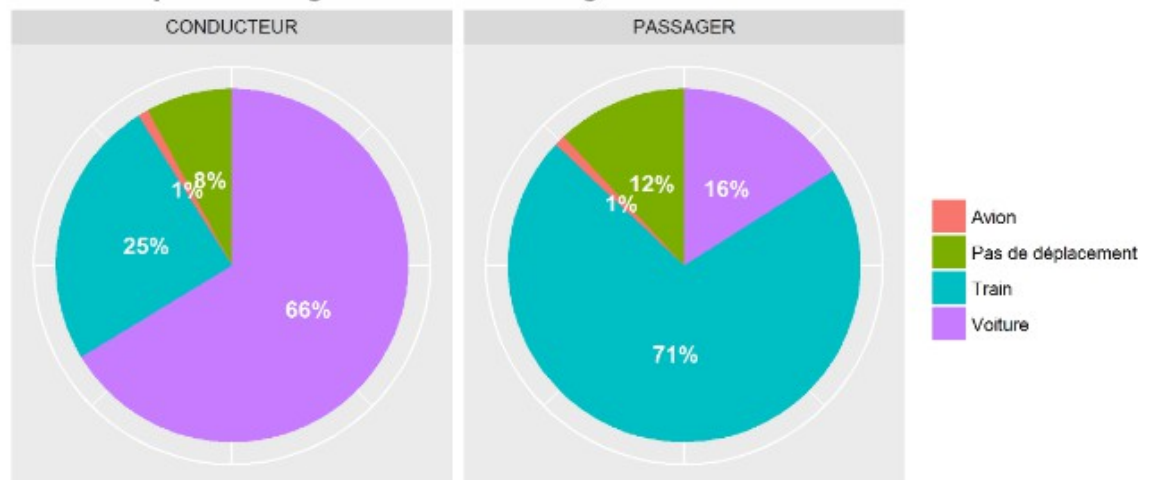
Une part modale à terme (5 à 10 ans) de l'ensemble autocar et covoiturage interurbains en France dans une fourchette de 10 à 25 % ne semble donc pas impossible.

Ces modes ont apporté de nouvelles solutions de déplacement, dans des gammes de distance principalement de 100-600 km, en particulier pour des publics aux revenus modestes, ou bien dans les cas où les solutions ferroviaires existantes n'étaient pas très pratiques.

Cependant, le bilan GES de ces modes n'est au mieux que très légèrement positif. Le bilan GES du covoiturage dépend largement du taux d'induction et du report modal. Or la grande majorité (71%) des passagers indiquent provenir du train, ou n'auraient pas voyagé (12%), et seulement 16 % auraient pris leur voiture. La grande majorité des conducteurs auraient conduit leur propre voiture (66%) mais 25 % proviendraient également du train et 8 % ne se seraient pas déplacés.

¹⁰³ Covoiturage longue distance, état des lieux et potentiel de croissance, études et documents CGDD, no 146, mai 2016, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED146.pdf>

Graphe 12 : Origine modale des usagers de blablacar



Source : ADEME, 6T, 2015, Enquête auprès des utilisateurs du covoiturage longue distance

Source : ADEME

Si l'on reprend les facteurs moyens d'émissions de l'ADEME en interurbain, on arrive, si on suppose que les personnes auraient voyagé presque seules en l'absence du covoiturage, à un bilan légèrement positif seulement. Il conviendrait toutefois de mesurer l'impact de l'alourdissement des véhicules et du recours probablement accru à l'autoroute.

Cela peut dégrader la performance du covoiturage en matière d'émissions.

STEADY STATE CONDITIONS						FUEL ECONOMY BENEFIT				
			30 MPH	45 MPH	60 MPH	75 MPH	30 MPH	45 MPH	60 MPH	75 MPH
			(mpg)	(mpg)	(mpg)	(mpg)	%	%	%	%
		Baseline	61.4	56.6	44.3	33.7				
Weight Reduction	5%	Baseline Engine	62.1	57.2	44.7	33.9	1.1%	1.0%	0.9%	0.7%
	10%		62.8	57.8	45.1	34.1	2.3%	2.1%	1.8%	1.4%
	20%		64.2	59.0	45.8	34.6	4.6%	4.2%	3.5%	2.8%
	5%	Engine Downsized to Baseline Performance	63.4	58.1	45.1	34.1	3.3%	2.6%	1.9%	1.4%
	10%		65.1	59.4	45.8	34.5	6.0%	4.8%	3.5%	2.6%
	20%		69.2	62.3	47.5	35.4	12.7%	10.0%	7.2%	5.2%

EPA fuel economy label projections are based on the derived 5-cycle regression equation for the 2008 model year.

4.5.11. Les impacts potentiels des nouvelles formes de déplacement urbains

De nouvelles formes de déplacement urbains apparaissent. En volume, le premier d'entre eux est le développement des véhicules de transport avec chauffeur (VTC). Cette nouvelle offre répond à des besoins de mobilité jusqu'alors souvent non satisfaite, à un prix plus abordable qu'auparavant.

Toutefois, si l'on regarde du point de vue des GES, une nouvelle offre a plutôt tendance à développer les déplacements.

Le bureau d'étude « 6-t » a réalisé une enquête en septembre 2015, financée par Uber. Il en ressort que, en Île-de-France, le nombre d'utilisations de la voiture par mois passe de 9,5 (6,1 en VP, 3,4 en taxi) à 10,7 (5,0 en VP, 0,8 en taxi, et 4,9 en voiture de type VTC ou Uberpop (qui était de fait en service à l'époque de l'enquête)) pour les répondants utilisateurs des services de Uber. L'usage des 2 roues motorisées baisse de 2,5 à 2,2, et celui des TC de 16,4 à 14,5.

On ne connaît pas précisément ni les facteurs d'émissions, ni les portées de ces déplacements, mais certains choix de paramètres permettent que le CO₂ émis augmente légèrement pour les utilisateurs d'Uber.

	dépl/mois	dépl/mois				
	avant	après	gCO2/voy-km	km/dépl	gCO2 avant	gCO2 après
VP+taxi+VTC	9,5	10,7	120	10	11400	12840
2R motorisés	2,5	2,2	60	8	1200	1056
TC	16,4	14,5	40	10	6560	5800
Vélo	3,3	2,9	0	3	0	0
Marche	7	6,9	0	1	0	0
total	38,7	37,2			19160	19696
						2,8%

Exemple de calcul - Source : calculs de la mission

« 6-t » a publié également une enquête relative aux pratiques de l'autopartage en trace directe en Île-de-France, de type Autolib, sur une durée en moyenne de 40 minutes et un trajet de 9km). Le véhicule peut être rendu dans une autre station qu'à la prise en charge. Elle montre un passage de 7,9 à 13,6 utilisations de la VP par mois pour les utilisateurs de ce service.

Avec les mêmes hypothèses, et en recourant à un véhicule thermique (et on pas à un véhicule électrique comme Autolib) le bilan pour les utilisateurs peut être une hausse des émissions significative.

Autopartage trace directe IDF						
	dépl/mois	dépl/mois				
	avant	après	gCO2/voy-km	km/dépl	gCO2 avant	gCO2 après
VP+T3P+AP	7,9	13,6	120	10	9480	16320
2R motorisés	2,5	2,2	60	8	1200	1056
TC	16,1	14,1	40	10	6440	5640
Vélo	4,4	3,7	0	3	0	0
Marche	9,4	9	0	1	0	0
total	40,3	42,6			17120	23016
						34,4%

Exemple de calcul - Source : calculs de la mission

« 6-t » a publié également une enquête relative aux pratiques de l'autopartage en trace directe en Île-de-France, de type Communauto (5 heures pour 40 km). Le véhicule est réservé à l'avance pour une durée déterminée. Il est souvent utilisé en périphérie. Elle montre un passage de 5,0 à 3,5 utilisations de la VP par mois pour les utilisateurs de ce service.

Avec les mêmes hypothèses, le bilan pour les utilisateurs est en baisse des émissions de GES. On voit parmi les inscrits une baisse de 67 % de leur parc automobile.

Autopartage en boucle IDF						
	dépl/mois	dépl/mois				
	avant	après	gCO2/voy-km	km/dépl	gCO2 avant	gCO2 après
VP+T3P+AP	5	3,5	120	10	6000	4200
2R motorisés	2,2	2,2	60	8	1056	1056
TC	16,7	17	40	10	6680	6800
Vélo	6,4	6,8	0	3	0	0
Marche	11,5	11,9	0	1	0	0
total	41,8	41,4			13736	12056
						-12,2%

Exemple de calcul - Source : calculs de la mission

« 6-t » a réalisé pour le compte de l'ADEME une enquête auprès des utilisateurs de l'autopartage entre particuliers (de type Drivy ou Ouicar ou Zipcar). Si cela peut répondre à la satisfaction de certains besoins de mobilité, le nombre de km parcourus en voiture, ainsi que l'équipement, n'évoluent ni pour les propriétaires ni pour les locataires. L'effet sur les GES semble donc proche de zéro en première approche.

« 6-t » a réalisé en septembre 2015 pour le compte de l'ADEME une enquête auprès des utilisateurs du covoiturage urbain, sur 4 zones géographiques. Du fait des meilleurs taux de remplissage des véhicules, des reports modaux limités et des inductions limitées, la réduction de CO₂ pour les utilisateurs est assez significative, de l'ordre de 36 % en moyenne.

Covoiturage urbain					
	Arc Jurassien	Grand Lyon, vallée chimie	Grand Lyon, porte des alpes	Grand Lyon, Nord de Lyon	Total
tCO2					
avant	3747	1699	1391	574	7411
gains	1228	611	535	266	2640
gains en %	33%	36%	38%	46%	36%

Exemple de calcul - Source : calculs de la mission

Si les VTC ou un service en autopartage en trace directe peuvent présenter des avantages en matière de remplacement de voitures particulières ou en réduction des besoins de stationnement, l'effet sur les émissions de GES ne semble aller dans le sens de la réduction que pour l'autopartage en boucle et le covoiturage à courte distance.

Toutes ces pratiques sont émergentes, et il est donc très difficile de dire aujourd'hui quel sera leur volume de demande à terme. Il est probable que ces différents types de mobilités puissent conjuguer leurs effets pour offrir un « bouquet » permettant de différer la motorisation.

Il existe également des pratiques encore plus émergentes, elles aussi difficiles à évaluer à ce stade :

- l'auto-stop sécurisé (exemple Ouihop ou Rezopouce) : le passager notifie son trajet désiré en temps réel et le conducteur le prend (ou pas) en stop, mais avec une sécurisation du dispositif (numéros de portables, numéro carte d'identité,...) en cas de problème de sûreté

- le covoiturage spontané assisté par des messages sur panneau à message variable (PMV), par exemple Ecov avec le dispositif Covoitici. Après une demande du passager sur smartphone ou borne physique, un PMV annonce aux conducteurs la nature de la demande exprimée. Le passager peut ensuite être pris en stop. Le PMV apporte une certaine visibilité au dispositif, et permet de toucher des conducteurs initialement non inscrits au service. Le passager quant à lui est inscrit, donc il y a une certaine sécurisation du dispositif. Au-delà d'une dizaine de déplacements par jour, l'installation du PMV pourrait être intéressante pour l'autorité organisatrice par rapport à une offre de TCU ou de transport à la demande (TAD), du fait des coûts salariaux érudés. Il est vraisemblable que ce dispositif soit attractif dans certaines gammes de densité urbaine.

Ces deux méthodes devraient plutôt renforcer le taux d'occupation des véhicules, et donc limiter les émissions de GES, cependant un effet de report modal et d'induction doit exister également. En première approche, ils peuvent renforcer le covoiturage urbain qui semble une pratique nettement réductrice de GES.

Le bilan de ces nouvelles pratiques de déplacement semble contrasté. Les deux plus importantes, VTC (peut-être 1%) et covoiturage urbain (3 % de part de marché), semblent présenter des effets de signe opposé sur les émissions de GES, avec une augmentation des émissions pour le VTC et une réduction pour le covoiturage urbain. Il en va de même des autres, l'autopartage présentant des effets très contrastés selon qu'il est en boucle (effet de réduction des émissions de GES), en « pair à pair » (neutre) et en trace directe (augmentation des émissions GES).

Une politique volontariste pourrait consister à chercher à développer le covoiturage urbain, via un renforcement des PDE (plans de déplacement entreprise), des PDIE (plans de déplacement inter-entreprises), l'accès à des voies réservées, les formes spontanées du covoiturage (auto-stop sécurisé, PMV) et l'autopartage en boucle (stations, parc de véhicules disponible).

Ces effets restent à ce jour très marginaux, mais pourraient augmenter si la fréquence d'utilisation de ces nouvelles mobilités venait à s'accroître.

4.5.12. Le levier de politiques de restriction du nombre de véhicules (enchères, loterie, nécessité de détention d'une place de parking...) est moins efficace que la hausse de la TICPE pour modérer les émissions de GES

Dans les très grandes villes asiatiques, des mesures de limitation du nombre de véhicules (au moins les VL, parfois d'autres véhicules) sont prises par les collectivités locales.

Il peut s'agir de limitation par des enchères (Singapour, Shanghai, Hong-Kong RAS, Canton), ou bien par un système de loterie (Pékin, Guiyang). Au Japon, la possession d'un véhicule est conditionnée par la détention d'une place de stationnement, ce qui revient à un système de quota à la possession en première approche, au moins dans les grandes villes.

La comparaison de Singapour avec quelques grandes villes mondiales permet d'illustrer les conséquences de ce type de système.

Le taux de possession est ramené à moins de 10 voitures pour 100 habitant (Singapour ou Hong-Kong), contre 20 ou 30 pour New-York ou Londres

respectivement. Paris intra-muros se situe à 33 voitures pour 100 habitants, la petite couronne de 36 (Seine-Saint-Denis) à 42 (Val-de-Marne) 52 (Hauts-de-seine), et la grande couronne de 48 à 53 véhicules pour 100 habitants.

Et ce sans que l'offre de transport public (km de chemins de fer par habitant ou de nombre de bus par habitant) soit sensiblement supérieure à celle de Londres ou New-York. La densité de route par km² peut également être limitée, tout en maintenant une bonne fluidité (64 km/h sur les voies express, et 29 km/h sur les « voies artérielles » en 2014 à Singapour).

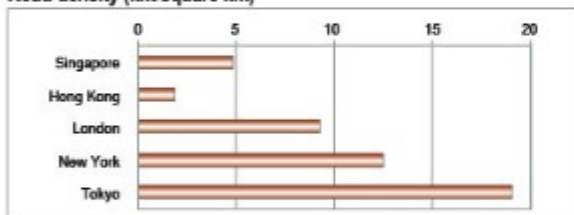
A Singapour, le prix du quota en catégorie A (VL de moins de 1600 cm³ et taxis) ressort à 67 675 \$ de Singapour en 2014, soit un peu moins de 45 000 euros. Le quota en catégorie B (voitures de plus de 1 600 cm³) est encore un peu plus cher autour de 48 000 euros. Les véhicules de transport de marchandises, les autobus, les 2 roues à moteur, et d'autres catégories sont inclus dans le système.

COMPARISON WITH SELECTED CITIES

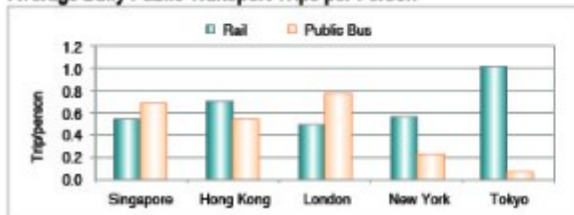
[12] Number of Cars/100 persons



Road density (km/square km)

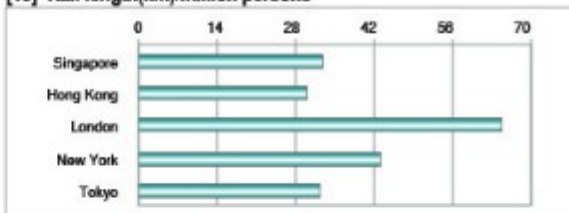


Average Daily Public Transport Trips per Person



COMPARISON WITH SELECTED CITIES

[13] Rail length(km)/million persons



Public bus fleet/million persons



Notes:

[12] Data sources:

Transport Department, MTR Corporation;
Transport International Holdings, Hong Kong;
Transport for London, United Kingdom;
MTA New York Transit, APTA, USA;
Tokyo Metropolitan Government, TOEI, Tokyo Metro, Japan;

[13] Rail includes MRT and LRT in Singapore;
MTR, Airport Express and Light Rail in Hong Kong;
Underground, Overground and DLR in London;
Subway in New York and Tokyo Metro and Toei Subway in Tokyo.
The public bus fleet in Hong Kong refer to franchised bus, including KMB, Citybus, NWFB, LWB and NLB.

ANNUAL AVERAGE QUOTA PREMIUM OF COE

	2013	2014
[5] Category A (Cars ≤ 1600cc & Taxis)	\$74,690	\$67,675
Category B (Cars >1600cc)	\$78,712	\$73,282
Category C (Goods Vehicles & Buses)	\$60,342	\$50,764
Category D (Motorcycles)	\$1,757	\$4,027
Category E (Open Category)	\$80,278	\$73,436

Source : Statistics in brief, Land transport Authority, Singapour, 2015

<https://www.lta.gov.sg/content/dam/ltaweb/corp/PublicationsResearch/files/FactsandFigures/Statistics%20in%20Brief%202015%20FINAL.pdf> ; NB : les prix sont libellés en \$ de Singapour soit environ 60 centimes d'euro

L'utilisation des voitures ressort à 17 500 miles soit environ 28 000 km par voiture et par an.

PRIVATE VEHICLE ANNUAL MILEAGE		
	2013	2014
[6] Average Annual Kilometres Travelled per Vehicle		
Cars	17,800	17,500
Private Hire Buses	51,800	54,400
School Buses	54,100	53,400
Light Goods Vehicles (≤ 3.5 tons)	30,000	30,500
Heavy Goods Vehicles (> 3.5 tons)	38,100	39,900
Motorcycles	12,900	12,800

Source : *Statistics in brief, Land transport Authority, Singapour, 2015*

<https://www.lta.gov.sg/content/dam/ltaweb/corp/PublicationsResearch/files/FactsandFigures/Statistics%20in%20Brief%202015%20FINAL.pdf>

Ainsi, si le nombre de véhicule est en gros 3 fois plus faible, l'utilisation de chaque voiture est en gros le double de celle que l'on constate en France en moyenne nationale (12 753 km en VP en 2014, Insee).

Au total, le nombre de voitures-km circulées par habitant ressort environ 40 % en dessous à Singapour par rapport à Paris intra-muros, à niveau de vie similaire en supposant en première approche un kilométrage des résidents parisiens proche de la moyenne nationale.

Ceci dit, Singapour a également mis en œuvre un système de péage urbain (ERP electronic road pricing)¹⁰⁴ de nature à réduire les trajets en voiture significativement, auquel s'ajoute une taxe sur les carburants comprise entre 0,41 et de 0,44 \$ de Singapour (27 à 29 centimes d'euros) par litre, donc inférieur au niveau français. L'effet sur les circulations du système de quota est donc inférieur à 40 %. Si la baisse affichée du niveau de trafic aux heures tarifées dans les zones tarifées est estimée par la LTA (land transport authority) de Singapour à 13 %, si l'on considère les effets des autres heures et autres zones, l'effet global du péage urbain pourrait être de 7 % environ. L'effet de différence sur les taxes sur les carburants pourrait jouer en sens inverse à hauteur de 4 % (avec une élasticité de la circulation au prix des carburants à -0,3 à long terme). Au total, l'impact des quotas pourrait être de 40 %-7 % + 3 % = 36 % sur les circulations.

Un système de bonus malus CO₂ à l'achat (dit CEVS) est également en place depuis mi 2015, avec des modulations allant jusqu'à plus ou moins 30 000 \$ de Singapour pour les voitures (environ 20 000 euros) peut également avoir des effets, ainsi qu'un système de réduction de l'offre de stationnement.

Il est vraisemblable qu'une personne pouvant, hors système de bonus-malus CO₂ payer 45 000 euros de prix en sus de celui du véhicule ne lésine pas sur sa cylindrée. La réduction des parcours-km ne se traduit donc probablement pas en réduction proportionnelle des émissions de GES, qui pourrait, avec un coefficient de division par 1,5 n'être que de 24 %.

Comme l'indique le site du ministère des transports de Singapour, chaque instrument a son rôle. « *Having the COE (enchères pour les véhicules) keeps overall demand for road space under control, while ERP (péage urbain) reduces traffic jams* ».

¹⁰⁴ COE and ERP, can we have just one, Ministère des transports de Singapour
<http://www.mot.gov.sg/Transport-Matters/Motoring/COE---ERP--Can-we-have-just-one/>

Le système d'enchères vise la maîtrise globale du besoin en espace de voirie, pas la réduction des embouteillages (le péage est plus cher à la pointe) ni la réduction des émissions de GES. Il n'a pas beaucoup en sens en dehors de très grandes métropoles, car l'espace n'est pas rare ailleurs. De plus, en Europe, la voirie par habitant, même dans les grandes villes, est relativement abondante.

Si des effets de modération des émissions de GES dans les grandes villes sont indéniables, l'effet sur la baisse de mobilité, à même niveau de réduction des GES, semble toutefois plus important que des mesures de type taxation à l'usage (taxe carbone au sein de la TICPE) ou bonus malus CO₂. Le ratio entre la réduction estimée des émissions de GES (-24%) par rapport à la hausse du coût de circulation sur le cycle de vie (+186 % à 150 000 km et 5l/100km) ressort ainsi à -0,13. C'est par exemple en dessous du ratio qui pourrait ressortir d'une hausse des prix du carburant, autour de -0,19 (pour une élasticité des circulations au prix des carburants à -0,5 à long terme).

L'effet significatif sur la baisse des émissions se comprend, car le prix des carburants amenant la même hausse globale sur un cycle de vie de 150 000 km ressortirait à 7,15 euros/litre.

Dans une ville ouverte, se pose également en pratique le risque de triche en immatriculant en dehors de la zone où les quotas seraient mis en place (cas de Pékin ou Shanghai).

La variante « loterie » semble plus égalitaire que celle des enchères, ceci dit le cas de Pékin montre qu'elle entraîne l'apparition d'un marché noir de location de plaques, posant également des problèmes d'identification des propriétaires effectifs.

4.5.13. Les politiques d'urbanisme ne présentent que des effets à très long terme sur la densification, et dont l'ampleur est discutée

On peut mener des politiques d'urbanisme visant à l'accroissement des densités urbaines. Les plus fortes densités urbaines mènent à des plus fortes parts modales des transports collectifs, ou des modes actifs (marche à pied, vélo). Elles permettent aussi de limiter l'importance des infrastructures de transport par m² ou par habitant (à commencer par la longueur), ce qui réduit la production de GES tant à la construction qu'à la gestion.

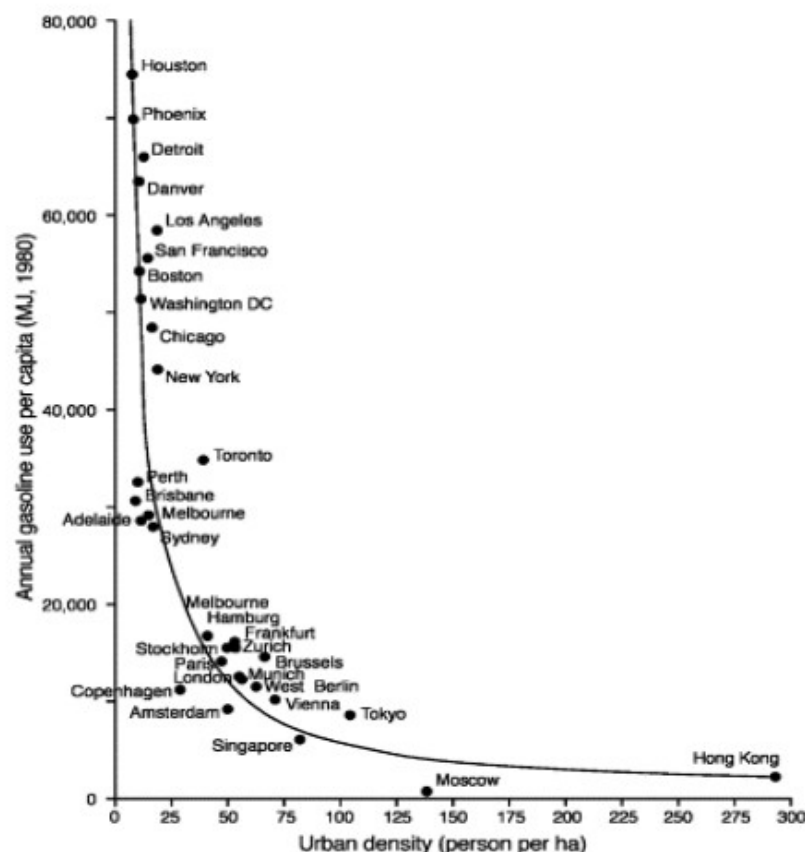
Le diagramme de Newman et Kenworthy ci-dessous illustre la relation constatée entre consommation de carburant (et donc en première approche les émissions de GES liées aux transports) et la densité urbaine. On y constate que les villes européennes, (et a fortiori les villes asiatiques) plus compactes, semblent amener une réduction d'un facteur 4 à 8 des émissions de GES par rapport à la ville Nord-américaine.

Cette analyse un peu simpliste ne prend cependant pas en compte les variables liées. Par exemple, on pourrait obtenir le même type de courbe en reliant les émissions au prix des carburants, bas en Amérique du Nord par rapport à l'Europe par exemple. Ceci, dit, des études ultérieures¹⁰⁵, isolant l'impact de chacun des facteurs amènent à considérer que le doublement de la densité peut réduire les véhicules-km de l'ordre de 27 %.

¹⁰⁵ Holtzclaw (1994)

La compacité des villes présente aussi des inconvénients ; certes il y a moins de véhicules-km, mais les trajets sont plus congestionnés, donc plus émissifs. L'espace à disposition de chacun est également plus faible, ainsi que le risque d'exposition au bruit des transports ou des voisins, toutes choses égales d'ailleurs. JP Orfeuil a montré également que les habitants des centre-villes compensent souvent leur mobilité au quotidien peu émissive (trajets courts, usage des TC) par des trajets interurbains souvent très émissifs. Il est à noter que les populations habitant dans les centre-villes denses présentent des spécificités (âge, composition familiale) qui influent également sur la mobilité, au quotidien et en interurbain.

Illustration III-3 : densité résidentielle brutes en fonction de la consommation d'énergie par tête



Source : Newman et Kenworthy, 1989

Diagramme de Newman et Kenworthy exprimant la consommation individuelle de carburant en fonction de la densité urbaine - Source : *Formes urbaines et durabilité du système de transports*, thèse de Florian Vanco p. 92, 2011, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00588787/document>

Florian Vanco dans sa thèse¹⁰⁶ compare l'effet d'une redensification urbaine à celle d'un meilleur appariement spatial domicile travail. Il obtient le résultat que cette dernière mesure présenterait une économie de CO₂ près de 50 fois plus élevée (53 000 tCO₂ contre 1 200 tCO₂) (page 273).

De toute façon, les mesures de densification urbaine ne peuvent présenter des effets que sur le très long terme. On compte moins de 1 % de renouvellement des bâtiments par an, donc, compte tenu du fait que le renouvellement ne signifie pas

¹⁰⁶ *Formes urbaines et durabilité du système de transports*, thèse de Florian Vanco p. 92, 2011, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00588787/document>

nécessairement remplacement, des durées de vie nettement supérieures à un siècle. Pour un objectif à 2050, donc à 35 ans, une politique sur 150 ans ne présenterait que 25 % de ses effets. Ce qui ne veut pas dire qu'il ne faut pas la mettre en place ; par contre il ne faut de toute façon pas s'attendre à des effets très visibles en 2050. A l'inverse, une absence de politique se traduit immédiatement par un accroissement des consommations d'espaces, des constructions d'infrastructures et des allongements des transports, aggravant ainsi les émissions de GES. Au vu du rythme nettement plus rapide des mutations immobilières, il paraît aussi raisonnable d'escompter un effet sur quelques décennies d'un meilleur appariement spatial domicile travail.

4.5.14. La fiscalité des mutations immobilières nuit à l'appariement domicile travail et donc constitue une source d'émissions de GES inutiles

La fiscalité de l'immobilier en France est caractérisée par une fiscalité significative lors de la mutation immobilière, dite DMTO (droits de mutation à titre onéreux), de l'ordre de 7,7 %, en sus de la fiscalité sur la détention elle-même (essentiellement la taxe foncière, la résidence principale étant exonérée d'impôts sur les plus-values).

Il en ressort probablement un frein à la mobilité résidentielle des ménages, par rapport à une situation où la fiscalité serait rééquilibrée au profit de la détention. Le marché de l'emploi étant segmenté, une personne qui perd son emploi, ou qui trouve un meilleur emploi ailleurs, est amenée à devoir choisir entre une mobilité résidentielle ou un maintien dans son domicile, mais au prix d'un plus long trajet si l'emploi est plus éloigné.

D'un point de vue micro-économique, pour un emploi plus éloigné, la personne peut ainsi choisir entre :

- issue 1 : déménager et retrouver un emploi: elle supporte un coût monétaire de $\text{taux_DMTO} \times \text{prix_logement}$, plus des coûts organisationnels et personnels. Pour un logement de 220 000 euros, avec un taux de 7,7 %, la taxe s'élève à près de 17 000 euros soit environ 10 mois de salaire médian mensuel
- issue 0 : ne pas déménager et retrouver un emploi; elle devra se déplacer plus loin par trajet et par jour ouvrable, et donc engager des dépenses de carburants et d'entretien du véhicule, user son véhicule et perdre son temps dans les trajets
- issue 0bis : ne pas déménager, et rester au chômage

Une étude de Christina Barcelo sur plusieurs pays européens¹⁰⁷ examine les probabilités conditionnelles de transition entre les deux premières alternatives. Une des variables susceptibles d'être explicative est le coût de transaction immobilier (dont l'auteur prend le logarithme).

Celui-ci influe sur les intensités de probabilités, de manière négative (-0,23) pour le changement résidentiel avec retour à l'emploi (issue 1) et positive pour le non changement résidentiel (1,28) (issue 0).

¹⁰⁷ Christina Barcelo, housing tenure and labour mobility, Document de travail, banque d'Espagne, 2006, Table 1, page 63, <http://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesSeriadas/DocumentosTrabajo/06/Fic/dt0603e.pdf>

Les coûts de transaction élevés semblent donc favoriser toutes choses égales d'ailleurs l'issue 0 (ne pas déménager et retrouver un emploi), qui implique des déplacements allongés, donc davantage d'émissions de GES.

Des travaux complémentaires seraient souhaitables pour estimer plus précisément le potentiel d'une mesure de réduction des DMTO sur les émissions de GES des transports. On notera que la récente évolution des DMTO a été à la hausse.

Supposons par exemple qu'une division par 2 des DMTO amène une durée de détention passant de 8 à 5 ans. Par rapport à un produit annuel de $17\,000/8=2125$ euros, le nouveau produit annuel serait de $17\,000/2/5=1\,700$ euros, soit une différence de 425 euros en moyenne annuelle à compenser par un autre impôt (taxe foncière ou autre). Cette estimation est sensible à la variation de la durée de détention en fonction du taux de DMTO.

La mesure n'aurait des impacts que sur les propriétaires (58% des ménages), mais a priori dans toutes les zones géographiques (hors interurbain). Le domicile-travail pèse environ la moitié du CO₂ émis dans les déplacements de personnes de la vie quotidienne (exemple 40 % à Lille et 55 % à Lyon¹⁰⁸), au-delà de la part dans les déplacements, du fait de leur plus grande longueur. Une baisse de 10 % des longueurs des trajets domicile-travail des seuls propriétaires se traduirait par une baisse des émissions GES des VL de $0,1 \times 0,58 \times 0,5 \times 0,6$ soit 1,7 % des émissions GES des VL. Ceci étant dit, il est possible que le temps ainsi libéré soit pour partie réutilisé par les ménages pour d'autres activités, donc induise un peu de déplacements sur d'autres motifs. On peut par exemple se limiter à 1,4 % des émissions GES des VL de ce fait.

En termes de co-bénéfices, on ne peut pas exclure aussi une meilleure fluidité du marché du travail et donc des impacts bénéfiques sur la réduction du chômage. Les ressources des collectivités seraient aussi moins sensibles aux cycles immobiliers.

Évidemment, l'approche est très simplifiée. Elle ne tient pas compte des différences de prix des logements entre le centre-ville et la périphérie, dans une ville à caractère « mono-centrique en première approche. Toutefois, cet effet est sur un autre plan que le sujet de l'impact des DMTO sur les adaptations des ménages à des changements de poste ou d'emploi. Certes un ménage contraint ne pourra de toute façon pas se relocaliser en centre-ville, sauf à choisir un logement trop petit. Mais il peut par exemple si son emploi passe de la banlieue nord à la banlieue sud, et qu'il réside en banlieue nord, migrer ou pas vers la banlieue sud. S'il ne le fait pas parce qu'il ne veut pas payer les DMTO, il est amené à circuler bien davantage, et ainsi à émettre des GES (et congestionner le système des transports).

Si l'estimation des conséquences de cette mesure est délicate, on ne prendrait pas de risque majeur à essayer. Bien entendu, cela suppose un partenariat entre l'État et les collectivités et des compensations.

4.5.15. La promotion du télétravail et de la visioconférence

En première approche, le télétravail devrait amener une réduction des émissions de GES liées au transport. À moyen terme, si cela permet également de réduire les surfaces de bureaux, cela peut réduire les émissions liées, mais à court terme, il est probable que le télé-travailleur occasionnel garde son poste de travail.

¹⁰⁸ Source : exploitation EMD Certu 2006

On notera qu'il peut y avoir un impact légèrement négatif lié au chauffage du domicile du télé-travailleur en hiver.

L'effet semble faible, des études américaines citent une économie de CO₂ aux États-Unis se limitant à une valeur comprise entre 0,01 % et 0,4 % des émissions tous secteurs (à rattacher au taux de télétravail ; aux USA une personne sur 10 environ travaille une journée ou plus chez soi par semaine¹⁰⁹), donc de 0,03 % à 1,2 % liées au télétravail lié au secteur des transports.

Il y a aussi effet rebond dans la mesure où le travailleur va réutiliser le temps libéré pour d'autres activités, inductrices de déplacements.

La promotion du télétravail trouve aussi ses limites dans les inconvénients qu'il peut causer dans l'entreprise en termes de productivité du travail collectif.

À noter que le bénéfice en réduction des GES pour le travailleur se rendant au travail en train est très faible, voire négatif.

Supposons 10 % de salariés en plus travaillant 1 jour par semaine en télétravail, soit un doublement du nombre de salariés et une intensification, ce qui serait une évolution déjà très significative.

Ceci amènerait un impact de 0,6 (déplacements quotidiens) x 0,5 (part du domicile travail dans le CO₂ du quotidien) x 0,1 (taux concerné de salariés) x 0,7 (taux de salariés dans l'emploi total) x 0,2 (1 jour par semaine) x 0,9 (part de la route) x 0,5 (effet rebond) x 0,8 (effet chauffage domicile) = 0,15 % des émissions de GES liés aux VL.

Pour ce qui concerne la visioconférence, une enquête de Cisco aboutit à ce que 83 % des réunions en visioconférence n'auraient pas eu lieu sinon, et donc à un potentiel d'induction de transport physique important par rapport à l'effet substitution. Le risque d'induction net paraît ainsi avéré, mais ne semble pas très documenté.

On notera qu'il n'est pas évident que les entreprises et autres employeurs aient spontanément recours à davantage de télétravail. Certes le progrès des puissances de calcul et la baisse de coûts et la hausse de la bande passante des télécoms pourraient spontanément contribuer à augmenter le taux de télétravail. Si c'est parfois dans l'intérêt du salarié, il n'est pas évident, mis à part des économies immobilières, qu'il y ait beaucoup d'avantages pour les entreprises.

4.5.16. Les risques et opportunités du véhicule autonome

Le présent paragraphe est particulièrement prospectif par nature, et n'entend pas être une discussion de la faisabilité technique ou de l'acceptabilité sociétale des véhicules autonomes.

4.5.16.1. Généralités et développement à court terme

De nombreux constructeurs automobiles ou autres entreprises ont indiqué entendre commercialiser vers 2019/20/21 des premiers véhicules autonomes neufs sur certaines infrastructures (mode dit de niveau 4 ou conduite autonome complète). D'ici l'atteinte de ce niveau, il semble que les effets sur la demande devraient être faibles, si le conducteur doit rester en tout temps attentif au contexte d'évolution. Cela peut être

¹⁰⁹ <https://www.qapa.fr/news/le-teletravail-aux-usa/>

discuté pour le niveau 3 (conduite autonome limitée où le conducteur doit être en mesure de reprendre le contrôle sur demande ; c'est le stade actuel des véhicules de Google par exemple), mais en théorie du moins, le temps du conducteur qui devrait rester à ce niveau toujours vigilant ne devrait pas pouvoir, à ce niveau 3 être libéré.

Le passage au niveau 4 sur certaines infrastructures à cet horizon pour certains véhicules neufs dans le haut de gamme ne paraît pas déraisonnable. Certains équipements critiques utiles pour atteindre un tel niveau de fiabilité voient leurs coûts baisser très fortement. Par un exemple un Lidar (radar détectant les natures des pixels face au véhicule et leur vitesse), qui coûtait 70 000 \$ il y a environ 5 ans, ne coûte tout au plus que quelques milliers de \$ aujourd'hui, et le MIT (Massachusetts Institute of Technology) annonce vouloir en produire dans quelques années pour 10\$ l'unité. Les algorithmes font également d'importants progrès, notamment avec le « deep learning » (apprentissage profond) utilisant plusieurs couches de réseaux neuronaux, procédant par une sorte d'apprentissage, à l'image du cerveau. Le prix de la puissance de calcul baisse également fortement, selon la loi de Moore.¹¹⁰

Les zones adaptées à la conduite autonome, pour les véhicules équipés, devraient s'étendre progressivement. Une approche consiste à établir par exemple une cartographie fine des lieux, pouvant expliquer, pour partie, l'intérêt des systèmes de cartographie pour les constructeurs.

Il paraît également vraisemblable que la zone autorisée à la conduite autonome s'étende pour un véhicule donné, et que le véhicule progresse également en performance au cours de sa vie, et ce au moyen de mise à jour logicielles de temps en temps. Des véhicules non autonomes au moment de leur commercialisation, mais « autonomisables » pourraient, pendant leur durée de vie économique, typiquement 10 à 15 ans, devenir autonomes pendant ce laps, par mise à jour logicielle, et éventuellement ajouts de capteurs et de calculateurs, prévus à la base.

Ceci impliquera également les autorités de régulation, qui devront autoriser ces véhicules et les zones aptes à la conduite autonome, peut-être les cas de figure (par exemple hors neige) aussi. Beaucoup de questions restent évidemment en suspens à ce stade.

4.5.16.2. Les perspectives du véhicule serviciel autonome

Un des sujets abordés dans la littérature scientifique est le caractère vraisemblable d'une émergence d'un véhicule serviciel autonome, ou autonome là où cela est possible. Le gestionnaire de cette flotte le proposerait aux utilisateurs, à peu près comme un VTC. Uber teste d'ores et déjà depuis août 2016 un tel système à Pittsburgh. Un autre opérateur propose un système similaire en test à Singapour. Dans les deux cas, actuellement, un employé reste à bord au cas où il y aurait un problème.

Le modèle économique du véhicule serviciel autonome en ville, en livraison urbaine, ou en trajets interurbains semble crédible. Cependant, probablement, tous les véhicules autonomes ne seront pas serviciels non plus. Mais le véhicule serviciel présente l'avantage de pouvoir circuler probablement davantage par jour, alors qu'un véhicule actuel, en pleine propriété, ne circule que 5 % du temps environ. Cela confère au véhicule serviciel autonome un fort avantage économique. Les véhicules serviciels ne

¹¹⁰ MIT and DARPA pack Lidar sensor into single chip, IEEE spectrum, Poulton et Watts, 2016, http://spectrum.ieee.org/tech-talk/semiconductors/optoelectronics/mit-lidar-on-a-chip/?utm_source=CarsThatThink&utm_medium=Newsletter&utm_campaign=CTT08172016

circuleront pas tout le temps non plus, notamment du fait que la demande est caractérisée par une pointe de matin et une pointe du soir, en usage quotidien en tout cas (en ville, ou en rural).

Il paraît vraisemblable que ces véhicules serviciels autonomes n'auront pas besoin de stationner autant que les véhicules actuels. Ceci pourrait donc réduire fortement la demande d'emplacements de stationnement, toutes choses égales d'ailleurs. Si par exemple, la durée de stationnement passait de 95 % à 50 %, la demande de stationnement serait divisée par 2. Là où le stationnement est le plus cher, donc au centre des grandes villes en général, aux heures de demande maximale de stationnement, il est vraisemblable que les véhicules autonomes repartent à vide chercher de nouveaux utilisateurs, ou bien aillent se garer plus loin là où le stationnement est moins cher. Les véhicules pourraient aussi circuler à vide pour se repositionner entre les différents trajets.

Peut-être, si les conditions économiques sont réunies, il pourrait être intéressant du point de vue privé d'attendre en circulant sur voirie à vide. Par exemple, si en centre-ville de Paris, le stationnement pour une journée coûte typiquement 10 euros, avec un coût de revient en circulation de l'ordre de 20 centimes par km en comptant une partie de l'amortissement, le véhicule peut parcourir 50 km, soit à 10 km/h de moyenne, circuler pendant 5 heures par exemple, donc par exemple entre la fin de la pointe du matin à 10 h jusqu'à 15 h au début de la pointe du soir. Évidemment, de telles circulations à vide sont émettrices de GES.

Du point de vue du conducteur, pendant une phase de conduite autonome, son temps est « libéré » pour d'autres activités : travailler, lire, se reposer,... De ce fait, la valeur ressentie de son temps pourrait baisser. Divers éléments laissent penser que cette valeur du temps pourrait baisser de l'ordre d'au moins un tiers, passant par exemple de 12 à 8 euros par heure.

Il est possible que les systèmes de conduite autonomes freinent de manière plus rapide que des conducteurs humains. Dans ce cas, il est possible que les capacités des routes augmentent, toutes choses égales d'ailleurs. La congestion routière pourrait donc de ce fait être réduite, à terme en tout cas, même si cela peut ne pas être le cas au début. Comme celle-ci est très sensible, la réduction de temps de trajet à l'heure de pointe urbaine congestionnée pourrait être sensible, voire même totale, dans l'hypothèse où la grande majorité des véhicules d'un axe seraient autonomes.

On ne peut cependant pas écarter non plus des scénarios où les autorités de régulation imposeraient des marges supplémentaires de prudence aux véhicules autonomes, de manière à réduire l'accidentologie encore plus. Cela peut aussi arriver pendant une phase temporelle seulement, voire à certains endroits.

Il est également possible que les difficultés de transition entre des phases autonomes (niveau 4) et des phases de conduite « manuelle » soient difficiles à surmonter. Cela pourrait limiter la diffusion des véhicules autonomes sur certaines infrastructures seulement, au moins pendant un certain temps. Ou bien la transition de phase de conduite pourrait s'effectuer uniquement véhicule à l'arrêt, au moins pendant une certaine période temporelle, et dans certains lieux ou types de cas.

Tous ces éléments sont donc a priori de nature à accroître la demande de transport en voyageurs-km, ainsi que les circulations routières à vide, tempérés néanmoins par les gains liés à la décongestion et à la fluidisation de la circulation. Ceci devrait amener à plutôt augmenter les émissions de GES, toutes choses égales d'ailleurs.

4.5.16.3. Un exemple de scénario d'évolution en zone urbaine

Pour fixer les idées sur un calcul (avec des ordres de grandeur éventuellement révisables), on peut par exemple scénariser une évolution hypothétique en trois étapes, en zone urbaine :

Étape 1 : Le temps du conducteur est libéré pour la moitié du temps (en gros sur la moitié des distances). Les vitesses n'évoluent pas.

Étape 2 : Le temps du conducteur est libéré pour tout le temps (partout ou presque). Les vitesses n'évoluent pas.

Étape 3 : Le temps du conducteur est libéré tout le temps. Les vitesses augmentent de 50 % (ce qui est élevé et est une hypothèse modifiable), du fait de la décongestion (réduction des temps de réaction au freinage).

On suppose à long terme une élasticité de la demande au temps de trajet valorisé (en euros) de -1, autrement dit quand le temps de trajet, ou sa valorisation baissent de 1 %, la demande augmente de 1 %. Ceci est cohérent avec l'hypothèse d'une constance des budgets temps à long terme (loi de Zahavi).

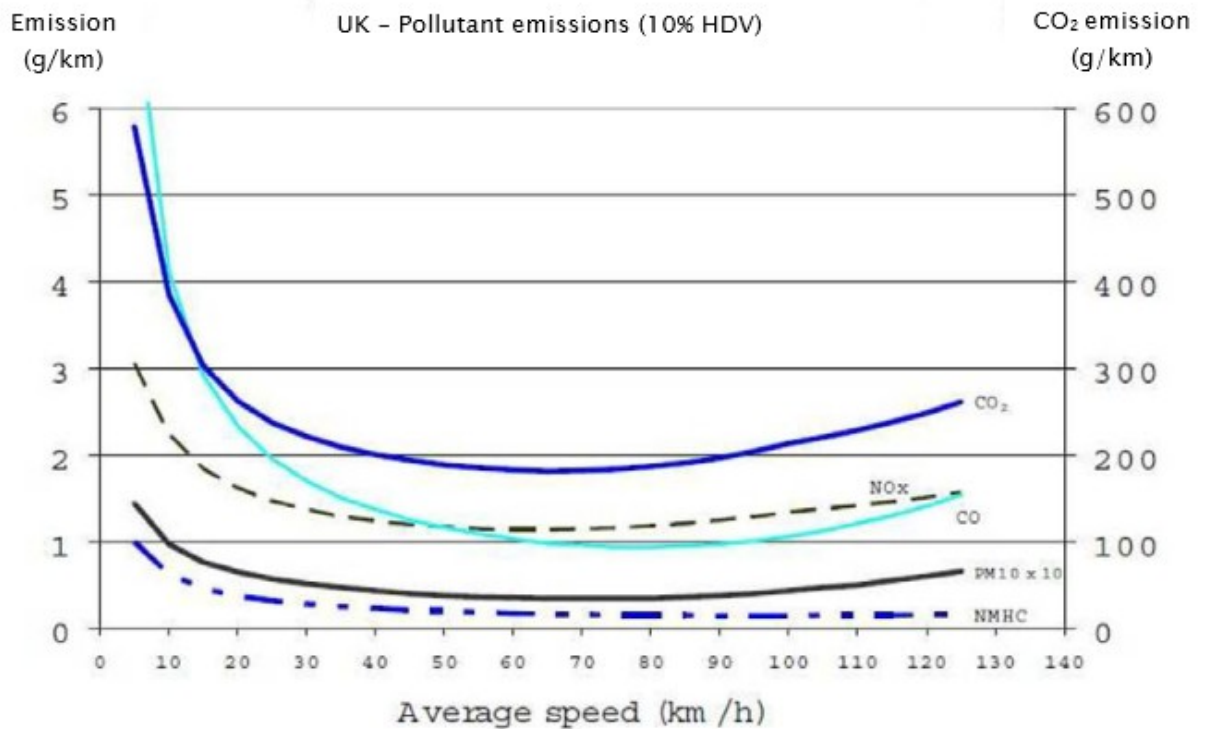
Les émissions de GES sont en première approche proportionnels à la distance parcourue, à même niveau de congestion. Toutefois la décongestion apportée dans l'étape 3 réduit les émissions unitaires par km.

La première étape voit une baisse des temps valorisés de 17 %, donc une hausse du trafic et des GES de 17 %.

La seconde étape voit une baisse des temps valorisés de 33 %, donc une hausse du trafic et des GES de 33 %.

La troisième étape voit une baisse des temps valorisés de 56 %, donc une hausse du trafic et des GES de moins que 56 %. Si par exemple on passe de 20 km/h à 50 % de plus soit 30 km/h, alors on peut réduire les émissions de l'ordre de 20 % de ce fait, soit une hausse des GES de 25 % seulement. (cf chapitre sur l'effet des vitesses).

Figure 7.5 UK pollutant emissions assuming 10% heavy vehicles by average speed



Émissions britanniques de polluant en fonction de la vitesse

A quel moment pourraient se situer les étapes de ce scénario d'évolution des transports autonomes en zone urbaine ?

La première étape nécessite que la plupart des véhicules soit autonomes. Si le début de commercialisation en niveau 4 se situe vers 2020 en haut de gamme, la commercialisation en milieu de gamme pourrait commencer vers 2025. Compte tenu de la diffusion dans le parc, une moitié des véhicules seraient autonomes en niveau 4 vers 2030, y compris des véhicules seulement « autonomisables » à la commercialisation et rendues autonomes avec des mises à jour logicielles et ajouts de capteurs. A cette date, la moitié des parcours (pas forcément des km de voirie, mais les plus utilisés) pourraient être autorisés en mode autonome.

La seconde étape pourrait arriver par exemple 10 ans plus tard, donc en 2040, le temps de continuer à traiter des voies à plus faible circulation. L'adaptation du parc se faisant par mise à jour logicielle.

La troisième étape verrait le début de mesures de la limitation puis d'interdiction de la conduite manuelle, considérée comme génératrice de pertes de capacité et d'accidents. Elle pourrait intervenir vers 2050.

De plus, si la demande de stationnement baisse, les prix du stationnement devraient, toutes choses égales d'ailleurs baisser. Ce qui réduira le coût monétaire du transport, et ce, pour les utilisateurs se rendant en centre-ville, et ne disposant pas d'un emplacement gratuit ou presque mis à disposition, très conséquent. Si typiquement, dans Paris intra-muros, le prix d'un stationnement par jour est de 10 euros, contre 2 pour chaque trajet, donc 10 sur 14 au total par jour, si le stationnement passait à 2

euros, le coût total baisserait de 14 vers 6 euros, soit une chute de 57 %. Ceci devrait aussi contribuer à augmenter la demande également. Par exemple, dans ce cas, avec une élasticité au prix du stationnement de -0,2, la variation de prix de 80 % amènerait une hausse de demande de 16 %, vers les zones où le stationnement n'est pas abondant (déplacements radiaux).

Les effets pourraient être un peu moindres en interurbain, du fait d'une moindre sensibilité de la demande au temps. Ce qui amènerait en première approche et sous les hypothèses retenues des hausses de GES en moyenne nationale de l'ordre de 15 % en 2030, 30 % en 2040 et 50 % en 2050, à tempérer par les éventuels gains liés à la décongestion, au recours collectif à des véhicules autonomes devenus populaires (voir ci-dessous), etc...¹¹¹

Bien entendu, il reste des marges d'incertitudes très importantes sur l'ampleur des effets ainsi que sur le calendrier. On note qu'il devrait y avoir des impacts sur les demandes pour la localisation. Ainsi, habiter loin des centres-villes peut-être gênant actuellement du fait du temps de conduite, non utilisable pour faire autre chose. Si ce temps est libéré, voire raccourci en plus, habiter en grande couronne dans une zone où l'espace est abondant et peu onéreux et travailler ou se divertir en centre -ville ne pose plus de problème majeur. Des effets majeurs sur les territoires sont donc à escompter aussi.

Une récente étude de McKinsey et BNEF¹¹² aboutit, au moins à relativement court terme, à des baisses de coût de revient de 30 à 60 % par unité de distance liée au véhicule autonome, ainsi que des hausses de km parcourus par les voyageurs de l'ordre de 12 à 24 %. Il note que la hausse de demande pourrait être encore plus forte du fait de la demande qui pourrait émaner des jeunes et des personnes âgées. Les effets de la libération du temps du conducteur ne semblent pas pris en compte, ce qui sous-estime assez manifestement l'induction de demande vraisemblable.

Ce papier note que, puisque les véhicules serviciels devraient circuler beaucoup, le point mort rentabilisant le véhicule électrique sera plus facilement atteint, et donc l'électrification des VP devrait ainsi être accélérée. Pour 10 % d'augmentation de la mobilité partagée dans le total, les auteurs tablent sur 5 % de véhicules électriques vendus en plus sur la période 2015-2030.

4.5.16.4. Le partage et ses conséquences

On notera cependant que le véhicule serviciel permet aussi de faciliter dans une certaine mesure le partage du véhicule. Si l'opérateur serviciel connaît l'ensemble ou une part significative de la demande de déplacements, il peut proposer aux passagers qui l'acceptent de se regrouper et de covoiturer. Cela leur réduirait les coûts, mais nécessiterait des allongements de trajet également. Dans la phase de transition, là où le véhicule ne pourrait circuler en autonomie, il faudrait qu'un des occupants conduise. Cela peut être un occupant qui conduirait en échange d'une réduction tarifaire, ou bien le propriétaire du véhicule, ou les deux. On pourrait ainsi voir un modèle économique émerger, avec des co-voitureurs en partage de frais, mais dont l'un d'entre eux serait le conducteur de référence, et donc serait amené à conduire. Il pourrait ainsi aussi endosser la responsabilité en cas d'accident. Ou bien, dans certains cas, notamment

¹¹¹ Understanding transport demand and elasticities, Victoria transport institute, Litman 2013, <http://www.vtpi.org/elasticities.pdf>

¹¹² McKinsey and company et BNEF (Bloomberg new energy finance), an integrated perspective on the future of mobility, octobre 2016. <https://about.bnef.com/white-papers/integrated-perspective-future-mobility/>

en phase autonome, ce pourrait être le propriétaire du véhicule. Être propriétaire du véhicule pourrait cependant être intéressant, de manière à disposer d'une priorité d'usage aux moments de la pointe de demande. Pour les utilisateurs habitant dans les couronnes urbaines les plus éloignées, il pourrait être nécessaire de conduire dans ces zones, peut-être moins denses donc non équipées, et où la probabilité de trouver un covoitureur devrait être plus faible.

Il est d'ailleurs possible que coexistent en même temps dans la même ville des véhicules serviciels partagés et des serviciels non partagés, et des véhicules en pleine propriété, parfois ouverts à des tiers. Les utilisateurs voulant garder le confort d'être seuls à bord pourraient choisir cette option, à condition de payer davantage. Ils pourraient d'ailleurs aussi parfois autoriser, si le cœur leur en disait, ou bien si le prix proposé était assez intéressant, des passagers à bord.

Il est difficile de dire quelle part des véhicules pourrait être partagée. On voit cependant que le potentiel est important, puisque, en ville, le taux d'occupation est de l'ordre de 1,4, dont environ 1,1 ou 1,2 à la pointe, et moins encore en motif domicile travail. Si on compte 4 places confortables à bord, le taux d'occupation pourrait être multiplié par 3. A même demande de transport en voyageurs-km, le nombre de véhicules-km pourrait ainsi être réduit au maximum de 66 %. Éventuellement, s'il apparaissait une flotte de grands véhicules ou minibus, la réduction potentielle du nombre de véhicules-km serait encore plus conséquente encore. Mais ce chiffre est un potentiel, dont la probabilité de réalisation paraît faible.

Une réduction de l'ordre d'un tiers, par exemple, serait déjà un objectif ambitieux, mais sûrement faisable à long terme. En gros, avec une hausse de 57 % de la mobilité en voyageurs-km et une baisse de 35 % des véhicules-km du fait de leur meilleur partage aboutirait à un effet neutre globalement hors effet de la décongestion sur les émissions unitaires, et une réduction des GES de 20 % si on en tient compte..

Si le taux d'occupation moyen est seulement doublé, passant ainsi de 1,4 à 2,8, l'effet serait même globalement d'une baisse émissions de des GES de 20 % environ, hors effet de la décongestion sur les émissions unitaires, et une réduction des GES de 35 % si on en tient compte.

Plus grand serait le nombre de participants à ce type de système, et plus le temps d'attente du passager et de détour pour chercher un passager serait bref, et donc aussi plus le partage du véhicule serait intéressant. Le problème principal est donc probablement l'amorçage, car s'il n'y a pas ou peu de participant à la base, il n'y en aura toujours pas ou peu l'année suivante.

Plus le prix des carburants, ou de l'énergie utilisée dans les transports, sera élevée, et plus il sera intéressant pour les personnes de participer à des systèmes de partage de ce type.

Plus les pouvoirs publics encourageront le partage du véhicule, en adaptant la voirie, en s'assurant de la création d'un seul registre pour éviter la fragmentation en cas de multiplicité d'opérateurs, en donnant des signaux tarifaires ou en rendant attractif le partage des véhicules, plus un scénario défavorable sur le plan des GES a des chances d'être évité, et même d'arriver à réduire les émissions ainsi. Probablement, la négociation avec le (ou les) opérateur(s) sera cependant difficile, mais les pouvoirs publics ont aussi des cartes dans leur main, à condition de les jouer pendant qu'il est encore temps. Cela peut passer par la conditionnalité du développement de cet opérateur, ou de la volonté de favoriser l'émergence d'un opérateur encourageant significativement le partage des véhicules.

À terme cela peut faire varier du simple au double les émissions de GES liés aux voitures. L'enjeu est donc loin d'être négligeable mais doit être quantifié de façon plus aboutie.

Même dans un avenir avec des véhicules (autonomes) largement à zéro émissions, de type électrique, il restera un fort enjeu sur les GES liés à l'énergie grise comme vu précédemment dans les considérations sur le véhicule électrique. Si une batterie tient un certain nombre de cycles et donc une certaine distance, si une certaine quantité de GES est impliquée dans sa fabrication et son démantèlement, alors toutes choses par ailleurs, plus augmentent les km parcourus plus les émissions dues au renouvellement des batteries augmentent.

Des recherches complémentaires sont nécessaires pour mieux apprécier ces risques et ces potentiels, mais à ce stade, on peut dire que l'arrivée des véhicules autonomes rend l'avenir nettement plus ouvert, quoique de façon incertaine du point de vue des GES.

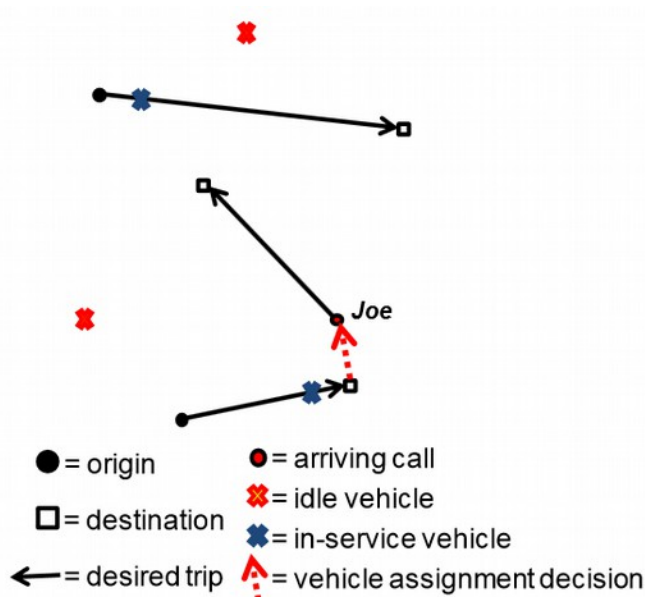


Figure 1. Shared, Driverless Fleet Assignment Decisions

Source : *Transforming personal mobility*, Burns, Jordan, et Scarborough, Columbia university, 2013,
<http://sustainablemobility.ei.columbia.edu/files/2012/12/Transforming-Personal-Mobility-Jan-27-20132.pdf>

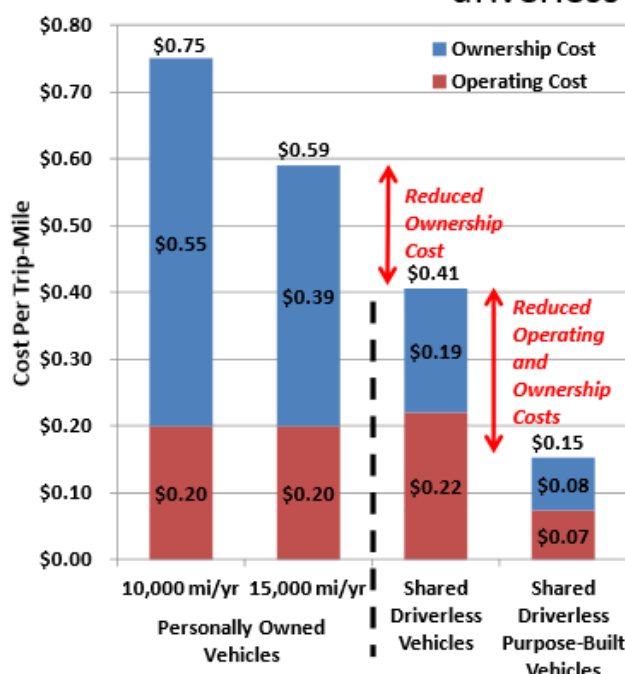
L'étude de la Columbia University simule ce système dans la ville de Ann Harbour, comportant environ 200 000 habitants, ainsi que des villes plus petites. Elle conclut à la faisabilité de très fortes réductions de coût, de l'ordre de 80 % en véhicule autonome partagé, et encore plus en tenant compte de la baisse des coûts de stationnement dans les plus grandes villes.¹¹³

¹¹³ Sources: *Transforming personal mobility*, Burns, Jordan, et Scarborough, Columbia university, 2013, <http://sustainablemobility.ei.columbia.edu/files/2012/12/Transforming-Personal-Mobility-Jan-27-20132.pdf> , *Driverless vehicles, a vision for Singapore transport*, ministère des transports de Singapour, 2016, <http://www.mot.gov.sg/Transport-Matters/Motoring/Driverless-vehicles--A-vision-for-Singapore-s-transport/>

Beaucoup d'éléments restent à l'évidence prospectifs, cependant une augmentation significative des voyageurs-km paraît très vraisemblable, ainsi qu'un renforcement du potentiel de partage des véhicules.

Ann Arbor Case Study

Personal travel costs can be dramatically reduced using shared, driverless fleets



- A shared, driverless vehicle fleet can provide the same mobility as personally owned vehicles at far less cost
- Cost/trip-mile could be reduced by 80% compared to a personally owned vehicle driven 10,000 miles/yr
- Reduced parking costs and the value of time not spent driving would further increase these benefits

Source : *Transforming personal mobility*, Burns, Jordan, et Scarborough, Columbia university, 2013, <http://sustainablemobility.ei.columbia.edu/files/2012/12/Transforming-Personal-Mobility-Jan-27-20132.pdf>

4.5.17. Quelle modération de la croissance de la demande de transport aérien est envisageable ?

Le fort développement du transport aérien et son impact sur les émissions amène à se pencher sur la question de la modération de la croissance de sa demande avec probablement plus d'acuité que pour les transports terrestres.

À ce stade, l'intérieur européen devrait entrer prochainement dans un système d'échange de droits à émettre du carbone EU ETS. Il faudrait examiner plus en détail le cadrage de ce marché, mais il semble peu vraisemblable que le prix de la tonne de CO₂ y dépasse 10 euros.

À ce prix de 10 euros par tonne de CO₂, correspond un surcoût d'environ 0,025 euros/litre. Pour un vol typique européen de 1 000 km et un avion de 180 à 250 sièges, avec une consommation de 633 litres aux 100 km avion, un nombre de passagers de 146, le surcoût par vol ressort à 1,1 euros par passager.¹¹⁴

Si le vol par sens coûte 60 euros, et si les surcoûts sont à moyen terme répercutés par le transporteur sur le passager, avec une élasticité-prix de la demande de -0,7, la

¹¹⁴ Source <http://eco-calculateur.aviation-civile.gouv.fr/decret.php>

baisse de trafic, serait de l'ordre de 1,2%. A 5 euros par tonne de CO₂, elle ne serait que de 0,6 %.

Il est vraisemblable que l'élasticité des émissions au prix soit un peu plus élevée, car la hausse des prix des carburants doit inciter à l'effort de productivité énergétique. Par exemple à 10 euros la tCO₂ l'impact serait de l'ordre de 1,5 % de modération des émissions concernées.

L'effet modérateur du système envisagé ne semble donc pas considérable mais pas négligeable non plus.

L'entrée du transport aérien dans le système EU ETS ne concerne pas à ce stade le transport international hors Europe.

Un scénario de taxe carbone, ou de système d'échange, à 100 euros la tonne CO₂, avec les mêmes hypothèses pourrait modérer la demande de l'ordre de 12 % et les émissions de 15 % de GES environ dans le périmètre appliqué.

On pourrait aussi envisager le passage de la TVA d'un taux de 10 % au taux normal de 20 %. Cela pourrait augmenter les prix des billets de l'ordre de 9 % si elle était répercutée intégralement, d'où une modération de la demande de 6 % et des émissions de 8% avec les mêmes élasticités.

Dans l'absolu, il ne semble pas y avoir de raison majeure pour différencier significativement le prix du CO₂ d'un secteur à l'autre, en dehors des sujets de variation du pouvoir réchauffant global (PRG) en fonction de l'altitude d'émissions.

En effet, en première approche, le facteur 4 amène à écrire un programme de maximisation du bien-être économique global sous contrainte inter-temporelle d'émission des GES. Le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte donne le prix associé à l'unité de PRG, et donc de CO₂, au niveau de la mer en tout cas.

Il est normal que le système de transport aérien mondial traite les différentes compagnies équitablement, et donc qu'une taxe CO₂ ne puisse être implémentée dans un seul pays. Le système EU ETS permet déjà de l'implémenter équitablement en Europe. Si son prix devenait très différent des systèmes comparables, au moins dans les pays développés, il pourrait y avoir des sujets de différence de traitement. Ceci dit ce problème est commun à tous les sujets liés à la maîtrise des émissions de GES, si un seul pays ou un seul bloc fait des efforts, la température augmentera malgré ses efforts non partagés par les autres acteurs, et ce pays sera économiquement pénalisé au-delà du raisonnable même s'il peut y avoir des avantages économiques à maîtriser certaines technologies avant les autres aussi.

Un sujet important est aussi l'horizon temporel auquel on doit estimer les coefficients de pouvoir réchauffant global. Celui-ci semble, pour le transport aérien en tout cas, varier fortement selon l'horizon, comme le montre le graphique ci-dessous.

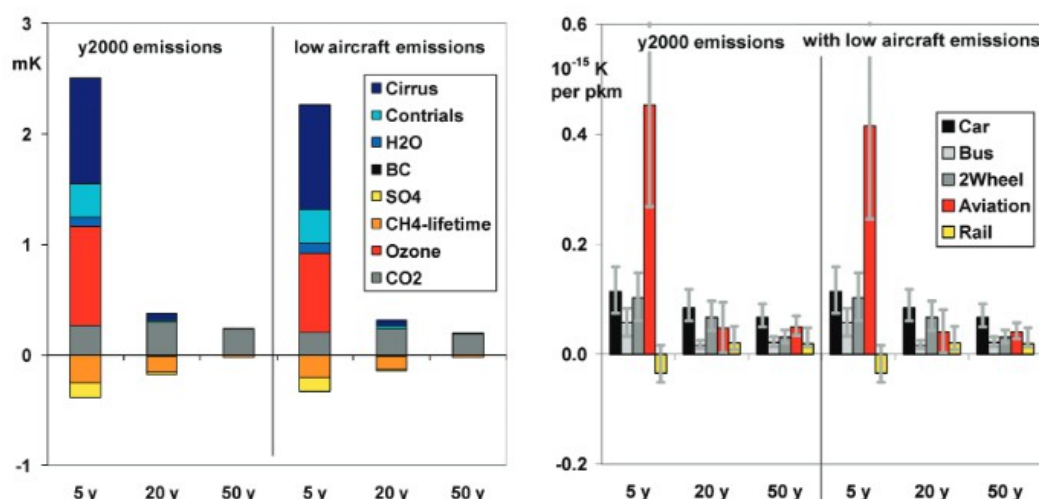


FIGURE 4. Comparison of temperature change for various years after the emissions due to aviation with standard emissions for the year 2000 and with reduced CO₂ and NO_x emissions (-20%). Temperature change per compound (left); specific climate impact of passenger modes per passenger-kilometer (right).

Source : *Specific climate impact of passenger and freight transport*, J Borken-Kleefeld, T Bernsten, J Fuglestved, *Environ sci tech*, 2010, 44,5700-5706, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9039693#/doi/full/10.1021/es9039693>

Conventionnellement, le PRG est souvent calculé à 100 ans. On pourrait toutefois se demander si un objectif formulé à 2050 ne devrait pas être estimé en fonction en première approche du demi-intervalle nous séparant de l'horizon 2050, soit $(2050-2016)/2=17$ ans, donc proche de 20 ans. D'un côté une telle approche serait à court terme alors que les effets sont à long terme, d'un autre il donne, si l'on ne perd pas de vue la perspective à long terme en se focalisant à l'horizon 2050, une image plus motivante pour une réaction rapide.

Une étude de 2010¹¹⁵ documente la dépendance des effets en fonction de l'horizon.

	Passenger Transport											
	dT ₅		dT ₂₀		dT ₅₀		iRF ₂₀		iRF ₁₀₀		iRF ₅₀₀	
	per pkm	per p-hr	per pkm	per p-hr	per pkm	per p-hr	per pkm	per p-hr	per pkm	per p-hr	per pkm	per p-hr
aviation	400	4660	56	650	74	860	250	2910	130	1500	90	1080
car	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2wheel	90	45	79	39	47	23	97	49	64	32	48	24
bus	50	33	20	13	33	22	30	20	31	21	33	22
rail	-30	-30	24	24	29	29	0	0	20	20	27	27

^a Mean global temperature change (dT) and integrated radiative forcing (iRF) over different time horizons and for various measures for transport work.

Forçage radiatif intégré à 20 ans, 100 ans et 500 ans pour différents modes de transports - Source : *Specific climate impact of passenger and freight transport*, J Borken-Kleefeld, T Bernsten, J Fuglestved, *Environ sci tech*, 2010, 44,5700-5706, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9039693#/doi/full/10.1021/es9039693>

Cette étude sur la « soupe » de GES indique un coefficient de forçage radiatif intégré (iRF) du transport aérien 92 % plus élevé à 20 ans qu'à 100 ans (indice 250 contre 130). Et même à 100 ans le coefficient iRF pour le voyage aérien serait 30 % supérieur à celui du VP par passager-km.¹¹⁶

¹¹⁵ Specific climate impact of passenger and freight transport, J Borken-Kleefeld, T Bernsten, J Fuglestved, *Environ sci tech*, 2010, 44,5700-5706, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9039693#/doi/full/10.1021/es9039693>

En bonne logique, pour construire un scénario facteur 4 de réduction des émissions de GES d'ici 2050, il faudrait décrire les évolutions du système de production et de demande, puis déterminer la trajectoire du prix du carbone et des autres GES permettant d'atteindre cet objectif.

Il existe comme on l'a vu des difficultés techniques intrinsèques du mode aérien à réduire ses émissions, liées au fait que le carburant doit présenter un très fort pouvoir calorifique par masse (et dans une certaine mesure par volume du fait des effets de frottement sur l'air) pour pouvoir non seulement embarquer la charge (comme les transports terrestres, déjà plus contraints que les sources fixes), mais aussi la soulever. On peut donc penser que dans une large mesure ce sont les contraintes du transport aérien qui devraient fixer la trajectoire temporelle de prix du carbone, théoriquement applicable à tous les secteurs et activités économiques.

A ce stade, l'application d'une taxe carbone à 100 euros la tCO₂, hors effet majoration pour PRG en altitude, pourrait modérer les émissions de 15 % dans les secteurs où elle serait appliquée, en supposant une application en Europe dès 2030 avec en 2050 une réduction en Europe de 25 % et dans le monde de 15 %.

4.6. Bilan des politiques d'action sur les comportements et la demande et recommandations liées

Toujours dans la limite des hypothèses envisagées, ressortent donc avec une évaluation plutôt positive du point de vue des GES les mesures suivantes, et une estimation par nature évidemment prospective de l'ampleur potentielle de l'effet (selon le nombre d'étoiles)

Mesure	Ampleur de l'effet
--------	--------------------

1) Mesures de taxation

Relèvement de la taxe carbone dans TICPE VL et PL	*****
---	-------

Augmentation sensible du prix du transport aérien	***
---	-----

2) Mesures de gestion urbaines

TIC pour la gestion de trafic	*
-------------------------------	---

Sévérisation du stationnement	**
-------------------------------	----

Voie réservées pour véhicules à occupation multiple	**
---	----

Politique pro vélo et VAE	**
---------------------------	----

Maîtrise de l'extension urbaine	*
---------------------------------	---

3) Mesures comportementales

Promotion du covoiturage urbain	**
---------------------------------	----

¹¹⁶ Specific climate impact of passenger and freight transport, J Borken-Kleefeld, T Bernsten, J Fuglestad, Environ sci tech, 2010, 44,5700-5706, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9039693#doi/full/10.1021/es9039693>

Encadrement des véhicules autonomes pour le covoiturage urbain	*****
Promotion du télé-travail	*
Apprentissage de l'écoconduite	*

4) Rééquilibrage fiscal pour la fluidification de la propriété immobilière

Rééquilibrage de la fiscalité immobilière pour réduire les droits sur les mutations **

5) Subventions aux TCU

Baisse prix TCU en IDF *

On insiste encore ici sur le fait que les résultats présentés sont surtout l'illustration d'une façon de poser les calculs, mais en aucun cas décisifs au vu de l'incomplétude des hypothèses et des incertitudes sur les paramètres de calcul. Ils ont vocation à indiquer la valeur implicite du carbone de telle ou telle mesure ; cependant la mesure peut être justifiée ou au contraire non justifiée sur le plan économique par d'autres considérations que les GES.

Il s'agit au mieux d'ordres de grandeur issus de modèles simplifiés.

5. Conclusion

L'objectif de réduction des émissions des transports est de 65 % en 2050 par rapport à 1990 (comité trajectoire). avec un point d'étape de 22 % en 2030 (SNBC). En 2013 les émissions (environ 135 MtCO₂éq) étaient environ 11-12% supérieures à celles de 1990 (121 MtCO₂éq).

Le secteur des transports voit ses émissions de gaz à effet de serre (GES) baisser conformément aux orientations de politiques publiques de 2005 jusqu'en 2014 (hors une légère reprise en 2009). Ce constat rassurant tient notamment à la modération des circulations, de la consommations de carburant provenant pour l'essentiel du renchérissement du prix du pétrole (passé de 15 \$ en 1999 à 100 \$ par baril en 2014), au ralentissement économique et à la désindustrialisation du pays, voire à la saturation de la croissance du parc de voitures particulières et à l'amélioration de son efficacité.

Le résultat n'est bon qu'en apparence, comme en témoigne la reprise des émissions de CO₂ liés aux transports en 2015 et début 2016.

La part des transports dans l'ensemble des émissions de GES française croît et se rapproche de 30 %.

Les leviers envisagés par la SNBC sont : maîtrise/décroissance de la demande/habitant ou unité de PIB, taux de chargement, efficacité énergétique, intensité carbone des carburants, report modal.

Les effets des mesures technologiques relatives aux motorisations et aux carburants dominent ceux des mesures comportementales, ou des nouvelles mobilités, qui les complètent cependant.

5.1. Les mesures relatives aux motorisations et aux carburants

Pour ce qui concerne les mesures technologiques, il convient de les décomposer en mesures relatives aux motorisations d'une part et mesures relatives aux carburants d'autre part.

5.1.1. Les mesures relatives aux motorisations des véhicules terrestres

Pour les motorisations, l'objectif aujourd'hui et à l'avenir est actuellement chiffré en grammes de CO₂ équivalents par km parcouru sur un cycle type. Ce cycle type ne semble pas complètement correspondre à la réalité des consommations, y compris pour les véhicules hybrides. De plus les émissions « grises » correspondant au cycle de vie du véhicule doivent être prises en compte, avec une part de fabrication plus importante pour le VE (au moins 1/3) que pour le véhicule thermique (1/5 ou 1/6) mais des émissions sur le cycle de vie moindres de plus de moitié.

Pour des déplacements urbains et de la vie quotidienne, sur des distances dont le maximum ne dépasse pas quelques centaines de km par jour, les motorisations électriques, intéressantes dans la mesure où l'électricité utilisée par les véhicules est produite de manière décarbonée, et les batteries ont effectué des progrès importants en matière de performance, de prix de revient et d'autonomie maximale. Au-delà, le

véhicule hybride rechargeable (VHR) peut-être intéressant si une grande part des trajets est effectuée avec de l'électricité.

Les systèmes de bonus-malus publics pour les motorisations devraient également inclure les empreintes carbone.

Dans plusieurs pays européens (Norvège, Allemagne, Pays-bas), des voix se sont élevées pour que les objectifs à 2025 ou 2030 visent aussi un plafond pour les motorisations thermiques à cette échéance. En tout cas, pour avoir encore un avenir, il convient que le moteur à combustion interne et le moteur hybride soient compétitifs avec, dans leurs gammes d'usage, les motorisations électriques ou hybrides rechargeables, tant en termes d'émissions (empreinte incluse) avec un potentiel de réduction de moitié, que de coût de revient, et en tenant compte du bruit et de la pollution locale.

Le développement du véhicule électrique est lié à celui des infrastructures de recharge, à domicile, sur le lieu de travail, ou sur la voie publique. Le développement au moins aussi rapide du véhicule électrique à la campagne ou en périurbain qu'en ville interroge sur l'effectivité suffisante du « droit à la prise »..

Il convient également de coupler le véhicule électrique (ou le VHR) avec un système de « smart grid » permettant de maximiser la part des recharges à des moments où l'électricité est faiblement carbonée. Si la motorisation électrique est appelée à se développer, les conséquences pour la production électrique et le réseau de transport et surtout de distribution de l'électricité ne seront pas négligeables et doivent également être anticipées.

Si le véhicule électrique doit être encouragé aujourd'hui, l'absence de fiscalité à long terme sur l'électricité utilisée dans les transports interroge le financement des infrastructures de transport.

La motorisation gaz se développe également, pour les poids lourds ainsi que pour les véhicules légers, mais sa contribution à la réduction des gaz à effet de serre reste assez modérée, de 5 à 15 %. La performance GES des véhicules électriques, dans leur domaine de pertinence, semble nettement meilleure, sauf usage intensif de bio-gaz (cf. infra).

Dans les autres cas (tracteurs routiers à dominance inter-urbaine, véhicules légers à dominance interurbaine) on peut envisager la motorisation gaz aussi pour des raisons de GES. Le gaz naturel ayant un PRG élevé, il convient que les fuites soient très limitées. Ce point mériterait d'être davantage clarifié.

5.1.2. Les mesures relatives aux carburants

Pour les véhicules utilisant des carburants liquides ou gazeux, une incorporation de bio-carburants permet de réduire les émissions de GES.

Pour les bio-carburants liquides, la première génération a montré ses limites, du fait de son entrée en compétition avec la chaîne alimentaire, notamment dans les pays les moins développés et d'un bilan d'émissions de GES sur le cycle complet parfois très décevant. La seconde génération est porteuse d'espoir, mais ses perspectives restent à clarifier eu égard aux contraintes de surface nécessaire. La troisième génération, à base d'algues, demanderait peu de surface, mais sa viabilité industrielle et environnementale reste à démontrer.

La récupération de biogaz provenant de la valorisation des déchets inévitables est intéressante. En revanche, le développement de filières agricoles à grande échelle pose plusieurs problèmes (compétition avec la filière alimentaire, fuites).

5.1.3. La nécessité des développements technologiques en rupture

Eu égard aux limites des différentes solutions, il est important que les technologies de rupture fassent l'objet de recherches et développement.

La pile à combustible à hydrogène a franchi une étape avec des véhicules circulant et faisant le plein en sécurité mais l'hydrogène doit être produit de manière décarbonée, ce qui exclut à terme le vapo-réformage. De plus les coûts doivent encore baisser.

Les carburants de synthèse réutilisant le carbone capturé dans les grandes installations fixes ont du potentiel.

Enfin, l'électrification des grands axes urbains semble une possibilité crédible.

5.1.4. Le cas du transport maritime

Il serait souhaitable que des objectifs globaux de limitation des émissions de GES le concernent aussi.

La voie des bio-carburants dans un contexte international semble difficile. L'usage du gaz naturel voire le recours à l'éolien conviennent au transport maritime.

5.1.5. Le cas du transport aérien

Des réductions fortes des émissions de GES lors de la phase au sol sont envisageables (tracteur électrique au sol, catapulte) ou en vol pour des distances régionales (recours au « turbo-prop » notamment).

Le transport aérien est entré récemment dans un système d'échange au niveau européen, le récent accord avec l'OACI peut modifier la situation à terme. Le prix du carbone dans ce système reste pourtant faible actuellement par rapport à la taxe applicable aux modes terrestres. L'accord CORSIA récemment signé sous l'égide de l'OACI soulève plusieurs questions (mise en œuvre lente, garanties données à l'additivité, effectivité des mesures de compensations basées sur le marché).

La question des impacts des émissions de CO₂ selon l'altitude et l'hygrométrie (et d'autres paramètres) des zones traversées est mal connue mais potentiellement importante.

Si on ne tient pas compte des compensations prévues dans l'accord « CORSIA », la rapidité de la croissance du transport aérien, surtout international, l'emporte largement sur les progrès unitaires par voyageur-km effectués en matière de réduction de réduction des émissions de GES. De ce fait, la contribution du transport aérien au changement climatique reste préoccupante, et semble, dans certains scénarios, pouvoir à elle seule, annuler les efforts de tout le secteur des transports, et donc aussi rendre l'obtention du facteur 4 tous secteurs confondus impossible.

5.2. Les mesures relative aux usages et aux comportements

Même si elles semblent présenter moins d'effet que celles sur les technologies de motorisations et les carburants, elles n'en restent pas moins nécessaires pour réduire fortement les émissions des GES.

5.2.1. D'abord la hausse des taxes sur les carburants fossiles

La première mesure est celle qui concerne les prix des carburants, surtout dans un environnement marqué actuellement, et peut-être durablement, par un prix bas du pétrole, autour de 50 \$ par baril. Une remontée de la TICPE, graduelle et prévisible, serait de nature à inciter durablement les utilisateurs du système de transports à émettre moins, que ce soit en circulant moins, ou au moyen de véhicules moins émissifs et/ou mieux remplis.

5.2.2. Privilégier les politiques de demande pour les transports collectifs avant les politiques d'offre.

Le développement des transports collectifs ferroviaires et urbains par la voie de l'offre semble rencontrer des limites ; pour le ferroviaire interurbain elles ont été identifiées par la commission « mobilité 21 ». Pour d'autres secteurs collectifs, il y a aussi vraisemblablement des rendements décroissants dans la mise en place de nouvelles lignes. Bien sûr, ces points sont à examiner au cas par cas, mais cette voie à elle seule, ainsi que celle de la baisse des prix des transports collectifs, pourrait trouver assez vite ses limites dans les disponibilités des financements publics.

En revanche, le levier des politiques d'action sur la demande de transports collectifs ne semble pas aussi utilisé qu'il pourrait l'être: actions par la limitation ou le prix (et l'observance) du stationnement, encouragement à l'usage pertinent de la voirie urbaine par davantage de voies réservées, au moins aux heures de pointe, aux véhicules peu émissifs par km ou bien remplis, donc peu émissifs par voyageur-km, ou bien au vélo et au vélo à assistance électrique. Sur ce point, il semble pouvoir encore possible accomplir encore des progrès en France ; si ces politiques sont le plus souvent du ressort des collectivités territoriales, l'État devrait pouvoir les accompagner davantage, à budget maîtrisé.

5.2.3. Un inventaire à effectuer pour les effets des nouvelles mobilités

De nouvelles mobilités se développent aujourd'hui (covoiturage, autopartage, autocars, vélos à assistance électrique, petits dispositifs électriques urbains). Leur potentiel devrait être davantage examiné, et il semble à ce stade que certains présentent un potentiel de réduction des émissions de GES (covoiturage urbain, autopartage en boucle), alors que ce n'est pas évident pour d'autres, même s'ils peuvent aussi, dans un effet « bouquet » contribuer à la démotorisation de certains ménages et donc à la réduction des émissions de GES.

D'autres éléments comportementaux pourraient être utiles pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre : télétravail, éco-conduite, renforcement de l'usage des technologies de l'information et des communications (TIC) dans les transports et la gestion des infrastructures. Leurs effets réels, leurs coûts économiques sont mal connus, et ils peuvent aussi amener des baisses d'émissions moindres que prévu

(effets rebond, contre report modal, comme cela semble documenté pour le covoiturage interurbain, ou l'autopartage en trace directe).

5.2.4. La vitesse semble davantage ressortir de politiques de sécurité et locales

La réduction des vitesses pratiquées en interurbain augment le temps perdu mais réduit les émissions de GES par km, la mortalité, la pollution locale de l'air ou le bruit.

5.2.5. La fiscalité sur les mutations immobilières présente vraisemblablement des effets de distorsion négatifs

Il est vraisemblable que la structure de certains éléments de fiscalité pourraient encourager l'usage des transports et donc des émissions de GES, sans compter les dépenses publiques induites pour accompagner la croissance des circulations; ainsi les droits de mutation sur les transactions immobilières peuvent, de par leur montant élevé, induire des émissions de GES sans réelle utilité pour les ménages et les entreprises.

S'il convient de lutter contre l'étalement urbain, les mesures contre les distorsions fiscales ne doivent pas être négligées non plus.

5.2.6. Le développement du véhicule autonome présente des opportunités (partage) mais aussi des risques (allongements des distances parcourues)

De manière prospective, le secteur des transports devrait être significativement impacté à partir de 2020 environ par le développement des véhicules autonomes. Les bénéfices attendus sont la facilitation de l'usage des véhicules et la réduction à long terme de la congestion. Le risque est que cet accroissement de mobilité des voyageurs et des marchandises amène davantage d'émissions de GES, et ce dans des proportions significatives. D'un autre côté, cette autonomisation des véhicules pourrait aussi renforcer le partage des véhicules, donc au contraire réduire les émissions de GES, peut-être compensant l'effet décrit plus haut. Mais cela imposerait une action forte des pouvoirs publics pour encourager ce partage des véhicules, au moyen d'une réforme de la fiscalité des circulations notamment, et de l'attribution de la voirie urbaine aux usages les plus groupés donc les moins émissifs.

5.2.7. La réduction des circulations a des effets majeurs sur le mode de vie et l'activité

Une réduction forte de la mobilité entraîne une rupture forte des modes de vie. Les niveaux de taxe sur les carburants ou sur la possession des véhicules ou sur la limitation du stationnement urbain nécessaires existent dans quelques grandes villes asiatiques (Singapour, Tokyo), mais pour gérer dans contraintes très fortes d'espace sans commune mesure avec ce que l'on connaît en France, et même en Île-de-France.

5.3. Esquisse de bilan global

Les mesures technologiques (motorisation et carburant) pourraient réduire, sans changement majeur de mode de vie, de l'ordre d'un facteur 2 (-53%) les émissions de GES des transports (hors aviation internationale hors Europe), empreinte carbone « grise » comprise.

Il s'agit principalement pour les circulations urbaines et de la vie quotidienne du recours aux véhicules électriques, ou à des progrès au moins équivalents pour des motorisations thermiques, en empreinte carbone globale.

Le recours aux bio-carburants de seconde génération, ainsi que du bio-gaz lié à la valorisation des déchets peut apporter des solutions dans les transports interurbains, dont l'ampleur reste encore à préciser. Les tracteurs routiers interurbains doivent développer l'usage du gaz naturel. Le sujet des fuites éventuelles de gaz nocives non pas à la seule sécurité, mais au changement climatique devrait être regardé de manière plus transparente en Europe.

La troisième génération de bio-carburants (algues), l'hydrogène ou la réutilisation du carbone capturé pour des carburants de synthèse pourront apporter des solutions pour ces circulations interurbaines, ainsi que dans une certaine mesure l'augmentation tendancielle significative de l'autonomie des batteries électriques, ou des systèmes d'échange de permis.

Le relèvement de la part taxe carbone TICPE terrestre vers un équivalent de 150 euros par tCO₂ en 2050, au-delà des 100 euros prévus pour 2030, ainsi que des mesures quantitatives pour le transport aérien européen similaires, pourraient réduire les émissions des moteurs thermiques d'environ 15 % selon certains calculs. Ce prix devrait être périodiquement ajusté pour tenir compte des trajectoires parcourues.

L'ensemble des mesures comportementales peut sous certaines hypothèses ne présenter qu'un effet assez limité, de l'ordre de 10 %, ce qui ne veut pas dire qu'il ne faut pas les mettre en œuvre, mais qu'il faut en vérifier que le bilan économique collectif reste intéressant, malgré les freins à la mobilité qu'elles peuvent parfois entraîner. Le nécessaire encouragement des transports collectifs devrait probablement davantage passer par des politiques de demande que des politiques d'offre, si l'on ne veut pas buter sur les contraintes budgétaires renforcées, voire même sur des contraintes physiques liées aux fortes émissions des véhicules de TC les plus mal remplis. Les nouvelles mobilités, l'usage renforcé des TIC peuvent dans certains cas apporter des éléments positifs pour la réduction des émissions de GES, mais un inventaire doit être effectué pour mieux comprendre ce qui doit être encouragé et le reste.

Enfin, le développement de l'autonomie des véhicules progressivement d'ici 2050 pourrait réduire de 20 % les émissions de GES, du fait des possibilités renforcées de partage des véhicules, mais aussi apportent des risques équivalents de dérapage liées à la facilitation de l'usage de ces derniers.

Il convient par ailleurs de tenir compte des augmentations des émissions constatées de 1990 à 2015, soit environ 15 %.

Au total, une division par 3 depuis 1990 (empreinte comprise) des émissions des GES dans les transports d'ici 2050 est envisageable, avec des efforts importants, mais sans rupture sur les modes de vie.

5.4. L'analyse socio-économique des mesures doit être renforcée

Il convient de promouvoir la diffusion de documentation directement utilisable sur les coûts d'évitement, et aussi d'évaluation socio-économique complète de mesures diverses, comprenant la prise en compte des co-avantages ou co-inconvénients, et ce selon divers niveaux de prix du CO2 envisageables d'ici 2050.

Sinon surgit le risque de rejet de politiques mal évaluées pouvant emporter un jour dans leur rejet avec elles des politiques efficientes.

