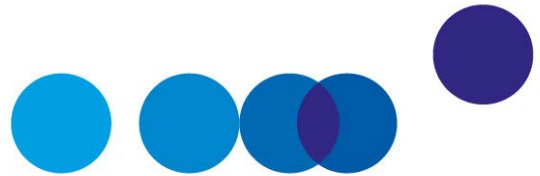


La valeur de l'action pour le climat

Une valeur tutélaire du carbone
pour évaluer les investissements
et les politiques publiques

Rapport de la commission présidée par
Alain Quinet



LA VALEUR DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

UNE VALEUR TUTÉLAIRE DU CARBONE
POUR ÉVALUER LES INVESTISSEMENTS
ET LES POLITIQUES PUBLIQUES

Rapport de la commission présidée par

Alain Quinet

Rapporteurs

Julien Bueb, Boris Le Hir, Bérengère Mesqui,
Aude Pommeret, *France Stratégie*

Matthieu Combaud, *Direction générale du Trésor*





AVANT-PROPOS

La lutte contre le réchauffement climatique impose de limiter les quantités de gaz à effet de serre, et tout particulièrement de gaz carbonique, présentes dans l'atmosphère. Pour honorer ses engagements en la matière, la France doit sensiblement accentuer ses efforts. Or elle a pris un retard important sur la trajectoire qu'elle devrait suivre pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, ou zéro émission nette (ZEN), inscrit dans l'Accord de Paris de 2015 et le Plan Climat de 2017.

Pour décarboner, il faut investir pour réduire les émissions. Le choix des investissements à effectuer doit se faire en fonction d'un coût par tonne d'émissions évitées. C'est ce que fait l'État pour ses propres investissements, en se fixant une règle : prendre en compte une valeur de la tonne de CO₂ évitée (ou équivalent) dans l'analyse socioéconomique qu'il effectue. C'est la « valeur tutélaire » du carbone. Ce cas particulier devrait être étendu à toutes les activités engendrant des émissions de gaz à effet de serre, pour pouvoir donner une « valeur de l'action pour le climat » qui leur soit applicable.

Le Premier ministre a demandé à Alain Quinet, qui avait déjà eu la responsabilité d'un premier rapport sur le sujet en 2008, de réunir une commission pour réviser, avec l'appui des équipes de France Stratégie, la valeur tutélaire, en tenant compte des nombreuses évolutions qui ont eu lieu au cours des dix dernières années.

Le rapport d'Alain Quinet dresse un panorama complet des analyses permettant, dans l'état actuel et prévisible des techniques disponibles pour réduire les émissions ou capter le carbone, de définir une trajectoire de valeurs dont la prise en compte permettrait d'atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Compte tenu de l'évolution des objectifs et des techniques, et du retard pris par rapport à la trajectoire souhaitable de nos émissions, elle conduit à réviser nettement à la hausse la valeur tutélaire cible, qui devrait s'établir à 250 € la tonne CO₂e en 2030, alors que la cible fixée en 2008 pour cette même date était de 100 €.

Le rapport invite la puissance publique à adopter des politiques permettant que cette valeur soit prise en compte dans le périmètre le plus large possible. La commission « Valeur de l'action pour le climat » préconise que soient utilisés des outils allant au-delà

des seuls signaux-prix, en combinant tous les instruments – réglementations, mesures facilitant l'accès au crédit et favorisant les investissements verts notamment – pouvant avoir des effets équivalents. Cette démarche pragmatique est nécessaire pour permettre une mise en œuvre effective, qui tienne compte de l'ensemble des conséquences économiques et sociales de ces évolutions nécessaires, et y apporte des réponses appropriées.

Gilles de Margerie

Commissaire général de France Stratégie



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	9
DÉMARCHE, RÉSULTATS, USAGES : MESSAGES CLÉS ET RECOMMANDATIONS	15
LES CHIFFRES CLÉS	31
GLOSSAIRE	33
CHAPITRE 1 – LE CONTEXTE MONDIAL : CE QUI A CHANGÉ DEPUIS DIX ANS ...	35
1. Le monde n'est pas sur la bonne trajectoire	36
1.1. Des risques de dommages graves et irréversibles.....	37
1.2. Un budget carbone mondial en épuisement rapide.....	39
1.3. Les scénarios du GIEC pour atteindre la neutralité carbone	43
2. Le champ des opportunités technologiques s'est élargi	45
2.1. Un avenir technologique plus prometteur	45
2.2. Des incertitudes importantes sur les coûts des technologies à l'horizon 2050	48
3. L'économie du climat fournit le cadre d'une atténuation efficace du changement climatique	50
3.1. L'analyse économique de l'atténuation d'une externalité globale.....	50
3.2. Une « boîte à outils » pour atteindre l'objectif de décarbonation au meilleur coût	52
4. Le contexte institutionnel est plus porteur, même si la coopération internationale reste insuffisante.....	57
4.1. L'Accord de Paris de 2015.....	57
4.2. L'élaboration de nouveaux référentiels de valeur du carbone	58

4.3. La mise en place d'outils de tarification du carbone	62
4.4. Des valeurs de référence du carbone globalement revues à la hausse au niveau mondial	63
CHAPITRE 2 – LA DÉMARCHE COÛTS-EFFICACITÉ.....	65
1. L'approche est fondée sur les engagements climatiques de la France	65
1.1. L'objectif « zéro émissions nettes »	66
1.2. L'horizon 2050	67
1.3. Le découplage entre émissions et activités humaines.....	67
2. La démarche de la commission s'appuie sur plusieurs instruments de prospective	72
3. Le cahier des charges se fonde sur un jeu d'hypothèses raisonnables	73
3.1. Les caractéristiques de la neutralité carbone prises en compte par la commission	73
3.2. L'horizon de la simulation.....	75
4. Le calcul d'une trajectoire pour la valeur du carbone repose sur des travaux originaux de modélisation.....	77
4.1. Les grandes catégories de modèles utilisées	77
4.2. Des modèles qui doivent être complétés pour couvrir tous les GES.....	81
4.3. Les principes généraux des exercices de simulation et de prospective	81
4.4. La modélisation du progrès technique.....	85
5. Le scénario de référence.....	87
5.1. Un environnement international « neutre ».....	88
5.2. Une hypothèse de croissance de 1,6 % par an en moyenne.....	89
5.3. Un scénario de référence sans signaux-prix sur le carbone	90
5.4. Une tendance favorable de gains d'efficacité énergétique.....	90
5.5. Des émissions de GES calculées par les modèles.....	91
CHAPITRE 3 – LES RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS EXERCICES DE PROSPECTIVE.....	93
1. Toutes les approches convergent vers une revalorisation substantielle de la valeur de l'action pour le climat	93
1.1. Les modèles.....	93
1.2. La prospective technologique.....	98

1.3. La sensibilité des résultats aux puits, aux comportements et aux coûts des technologies.....	102
2. L'investissement constitue l'enjeu principal d'une transition réussie vers la neutralité carbone	111
2.1. Les évolutions sectorielles.....	111
2.2. Les grands leviers de convergence vers la neutralité carbone.....	115
CHAPITRE 4 – LA VALEUR DE L'ACTION POUR LE CLIMAT	121
1. La trajectoire proposée s'ancre sur une valeur de 250 € en 2030	121
1.1. Une trajectoire unique pour l'ensemble de l'économie.....	121
1.2. Une trajectoire pluriannuelle ancrée sur une valeur de 250 € ₂₀₁₈ /tCO ₂ e en 2030	122
2. La trajectoire est revue à la hausse, en ligne avec les travaux internationaux de modélisation les plus récents	124
2.1. Une revalorisation de la trajectoire trouvant son origine dans l'épuisement du budget carbone mondial et français.....	124
2.2. Une trajectoire en cohérence avec les travaux internationaux les plus récents.....	126
3. Une coopération internationale plus intense permettrait de réduire les coûts d'abattement	127
3.1. Les incertitudes technologiques et comportementales.....	127
3.2. La valeur de l'action internationale	128
4. La valorisation des actions de décarbonation	129
4.1. Le montant des actions de décarbonation rentables.....	129
4.2. La valeur des émissions évitées par les actions engagées.....	133
4.3. Le coût socioéconomique des émissions résiduelles de gaz à effet de serre et la valeur des puits.....	134
CHAPITRE 5 – UN RÉFÉRENTIEL POUR VALORISER LES IMPACTS CLIMATIQUES DES PROJETS D'INVESTISSEMENT PUBLICS	137
1. L'évaluation socioéconomique des projets doit être étendue et renforcée....	138
1.1. Toutes les personnes publiques sont concernées	138
1.2. Tous les domaines de l'action publique sont concernés	141

2. L'ensemble du cadre d'évaluation doit être rénové à l'aune de l'objectif de neutralité carbone.....	143
2.1. La valorisation de la contribution des projets à la décarbonation de l'économie doit intégrer une analyse des risques.....	144
2.2. Les incidences de long terme des projets de lutte contre le changement climatique.....	148
2.3. La prise en compte de l'ensemble de la vie des projets	149
CHAPITRE 6 – UNE BOUSSOLE POUR L'INVESTISSEMENT ET L'ACTION	151
1. La valeur de l'action pour le climat permet de préciser des actions sectorielles de décarbonation utiles à la collectivité.....	152
1.1. L'évaluation des coûts d'abattement socioéconomiques	153
1.2. Une approche dynamique de l'ordre de mérite.....	159
1.3. Une référence étendue à l'ensemble de l'économie	162
2. La valeur privée des actions doit être rapprochée de leur valeur socioéconomique	163
2.1. Une décarbonation profonde des activités humaines repose nécessairement sur un éventail de mesures complémentaires	164
2.2. L'évaluation par usage de l'ensemble des mesures de décarbonation mises en œuvre doit être renforcée.....	165
3. Synthèse : le mode d'emploi de la valeur de l'action pour le climat	169
CONCLUSION GÉNÉRALE	171
ANNEXES	
Annexe 1 – Lettre de mission	175
Annexe 2 – Membres de la commission	177
Annexe 3 – Auditions	179
Annexe 4 – Bibliographie	181



INTRODUCTION

L'ambition française est d'éliminer les émissions de gaz à effet de serre sur le sol national à l'horizon 2050. C'est l'objectif « ZEN » : zéro émissions nettes de gaz à effet de serre liées aux activités humaines, les émissions *brutes* résiduelles ayant vocation à être absorbées par les puits de carbone que sont notamment les forêts, les prairies et à plus long terme les dispositifs techniques de capture et séquestration du carbone.

Cette ambition doit s'incarner dans des changements de comportement, des investissements publics et privés, et plus généralement dans un ensemble d'actions publiques et privées. Il faut agir sur un front large, mais il faut aussi agir dans le bon ordre, fixer des priorités, concentrer les moyens sur les actions utiles, arbitrer entre le déploiement rapide de technologies matures et l'anticipation de nouvelles solutions permises par les innovations en cours, accompagner les transitions industrielles et sociales.

Donner une valeur monétaire à l'action pour le climat, c'est reconnaître la valeur de l'action par rapport à la non-action, c'est signaler que les activités humaines doivent intégrer, « internaliser » les bénéfices collectifs que procure la réduction des émissions de gaz à effet de serre. C'est se donner une référence pour sélectionner et hiérarchiser les actions utiles à la collectivité.

La valeur de l'action pour le climat s'inscrit dans une stratégie publique de long terme exprimant une vision partagée de la lutte contre le changement climatique – en l'occurrence l'Accord de Paris de 2015 et le Plan Climat de 2017. Dans le cas particulier de l'analyse socioéconomique des investissements publics, l'État décide de la valeur qu'il va retenir pour les évaluer : c'est le sens originel de l'expression de « valeur tutélaire », étendu ici à un cadre plus général.

S'inscrivant dans une longue tradition française de calcul économique, et dans la démarche des précédentes commissions présidées par Marcel Boiteux (2001) et Alain

Quinet (2008)¹, le présent rapport est le fruit du travail d'une commission composée d'une vingtaine d'experts et d'économistes de l'environnement issus de l'université, des centres de recherche et des organisations internationales, du monde économique et social, des organisations non gouvernementales et de l'administration². La commission « Valeur de l'action pour le climat » a mobilisé pour élaborer ses propositions cinq équipes de modélisation, auditionné plusieurs personnalités et tenu de nombreux ateliers ouverts aux représentants des différents secteurs de l'économie³.

La valeur de l'action pour le climat mesure la valeur pour la collectivité des actions permettant d'atteindre l'objectif de neutralité carbone

Par l'Accord de Paris de 2015, les parties se sont fixé comme ambition collective de parvenir à la neutralité carbone au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle, l'Accord invitant les pays développés à atteindre cet objectif avant les pays en développement. Cet objectif s'appuie sur le diagnostic du Groupement d'experts internationaux sur le Climat (GIEC) d'un épuisement du budget carbone – c'est-à-dire des marges résiduelles disponibles pour émettre des gaz à effet de serre – si l'on veut contenir le réchauffement climatique en deçà de 2 °C. Sur la base des tendances passées, nous n'avons devant nous que trois décennies d'émissions à notre disposition : au-delà, notre marge de manœuvre sera épuisée, avec un risque élevé que se matérialisent des dommages graves et irréversibles.

La lutte contre le changement climatique et les bénéfices qu'elle procure pour la collectivité ne sont pas spontanément pris en compte dans les calculs de rentabilité financière des acteurs publics et privés. La valeur de l'action pour le climat – ou valeur tutélaire du carbone – vient combler cette défaillance de marché : elle donne une mesure du chemin qui reste à parcourir – et exprime en conséquence la valeur que la société doit accorder aux actions publiques et privées de décarbonation permettant d'arriver au bout du chemin. Ce sont les deux faces d'une même pièce.

¹ Commissariat général du Plan (2001), *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, rapport du groupe présidé par Marcel Boiteux, Paris, La Documentation française ; Centre d'analyse stratégique (2008), *La Valeur tutélaire du carbone*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.

² La liste des membres de la commission figure en annexe 2.

³ La liste des personnes auditionnées figure en annexe 3.

Le relèvement de la valeur de l'action pour le climat donne d'abord une mesure du chemin à parcourir

Pour 2030, horizon des investissements qui sont déjà ou vont être prochainement décidés, la commission propose une valeur tutélaire de 250 €₂₀₁₈ la tonne d'équivalent CO₂ (CO₂e), soit un relèvement substantiel par rapport à la cible de 100 €₂₀₀₈ fixée en 2008. Ce relèvement reflète le caractère limité du budget carbone à notre disposition ; elle révèle la nécessité d'investir durablement dans les technologies bas carbone, et le coût de ces technologies.

Au-delà des années 2030, la valeur proposée s'aligne progressivement sur une règle de Hotelling, c'est-à-dire la règle de bonne gestion d'une ressource épuisable, dont la valeur a vocation à croître au rythme du taux d'actualisation – et n'est donc pas écrasée à long terme par le jeu de l'actualisation. Elle est à l'horizon 2050 en ligne avec les coûts prévisibles des technologies structurantes nécessaires à la décarbonation – soit une fourchette prudente de 600 à 900 €₂₀₁₈/tonne de CO₂e.

Les incertitudes vont croissantes au fur et à mesure que l'horizon considéré s'allonge au-delà de 2030. Une valeur de l'action pour le climat plus faible en fin de période – ramenée en dessous de 500 € – refléterait une coopération internationale plus forte, permettant d'accélérer la production et la diffusion d'innovations, et rendant possibles des technologies de rupture.

Le relèvement de la valeur de l'action pour le climat étend le champ des actions rentables pour la collectivité

La valeur de l'action pour le climat donne une valeur monétaire aux actions publiques et privées de décarbonation. Elle permet traditionnellement d'évaluer et de sélectionner les investissements publics sur la base de leur valeur socioéconomique (et non pas seulement financière). Mais son usage doit être élargi pour appuyer la définition des priorités de politique publique. Si la valeur de l'action pour le climat est de 250 €₂₀₁₈ à l'horizon 2030, cela veut dire que toutes les actions qui coûtent moins de 250 €₂₀₁₈ la tonne de CO₂e évitée doivent être entreprises (un grand nombre de gestes de rénovation thermique de bâtiments, le déploiement de certaines énergies renouvelables pour produire de la chaleur, par exemple). Sinon l'objectif risque de ne pas être atteint. À l'inverse, des actions dont le coût est supérieur à 250 € ne devraient être mises en œuvre que si, à l'horizon de leur déploiement total, la trajectoire de valeurs tutélares est supérieure à leur coût.

Plus généralement, une trajectoire pluriannuelle de valeur tutélaire du carbone lisible et crédible permet à chacun de mesurer si des efforts adéquats sont engagés dès à présent

pour atteindre l'objectif de décarbonation, d'évaluer si les moyens sont mobilisés au bon niveau et au bon moment. Elle rend ainsi possibles des investissements à temps de retour longs que l'incertitude ou la volatilité pénalisent.

Une fois le périmètre des actions rentables du point de vue des objectifs de l'action pour le climat identifié, l'État ou les collectivités territoriales peuvent choisir de les prendre en charge directement par des investissements publics. Ils peuvent aussi, lorsque cela est nécessaire, orienter les choix privés, par la tarification du carbone, des subventions à l'acquisition d'équipements décarbonés ou des mécanismes de partage de risque de développement entre public et privé, des réglementations. Dans ce cadre, la valeur de l'action pour le climat ne préjuge pas de la bonne combinaison des mesures de politique environnementale disponibles. Elle fournit une référence pour vérifier que « l'addition » de ces mesures sur un usage donné (l'incitation à utiliser le véhicule électrique, par exemple) est bien dimensionnée. Le cumul des mesures doit être suffisant pour permettre de basculer vers un usage décarboné. Il faut, à l'inverse, vérifier que les coûts implicites des normes, plus difficiles à « lire » que les signaux-prix, ne sont pas trop élevés.

La décarbonation de l'économie est possible moyennant des changements de grande ampleur des technologies et des usages

Nos travaux confirment, s'il en était besoin, que la France n'en a pas fait assez dans la lutte contre le changement climatique : les émissions de gaz à effet de serre ont bien baissé depuis 1990, mais notre pays est toujours en retard par rapport à son tableau de marche. Nos travaux indiquent également que ce retard peut être comblé par une plus grande sobriété (des équipements bien dimensionnés par rapport aux usages et mieux utilisés), des gains d'efficacité énergétique, un meilleur usage des sols et le déploiement à grande échelle de nouvelles technologies décarbonées.

Parvenir à éliminer les émissions de gaz à effet de serre en soutenant l'activité suppose un effort durable d'investissement

Décarboner « intelligemment » – sans comprimer le PIB, sans provoquer de « fuites de carbone » – suppose d'investir aujourd'hui dans des technologies propres et de décarboner le stock de capital entendu dans le sens le plus large possible : les usines, le parc de production d'énergie, les exploitations agricoles, les bâtiments et les logements, les flottes de véhicules, etc.

L'investissement est la clé : c'est lui qui rend possible le découplage entre émissions de gaz à effet de serre et activités humaines ; c'est lui qui rend possibles les changements de comportement en faisant émerger des solutions alternatives.

La France a réduit ses émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 80 millions de tonnes depuis 1990 ; il faut en abattre quatre fois plus d'ici 2050. Le besoin de redéploiement des financements et des investissements vers les usages décarbonés est bien documenté à l'échelle internationale, notamment par les travaux récents de l'OCDE¹, du New Climate Economy Project² et de la Commission européenne³. Nos simulations confirment ce besoin durable d'investissement « vert » : il faut à la fois redéployer vers la lutte contre le changement climatique une partie importante des flux d'investissement actuels, et assumer un surcroît d'investissement pouvant atteindre 10 % par an. L'investissement requis ne reflète pas seulement un besoin de grands projets (développement des moyens de production d'électricité et des réseaux), mais aussi le cumul d'un grand nombre de petits projets portant sur des actifs existants (rénovation thermique des bâtiments, conversion des flottes de véhicules thermiques en véhicules décarbonés, etc.) ou de nouveaux actifs locaux (installations locales de production d'énergies renouvelables, de bornes de recharge électrique, etc.).

Le rôle des politiques publiques est aussi de soutenir l'innovation. Une partie du chemin visant à découpler émissions et PIB peut être accomplie en investissant dans des technologies existantes. Mais il faut aussi développer des technologies non matures aujourd'hui, en saisissant l'opportunité de développer des filières industrielles en France. L'innovation pourrait ouvrir de nouvelles opportunités pour augmenter la taille des puits de carbone (*via* la capture et le stockage du CO₂), stocker durablement l'énergie et élargir le champ des alternatives au pétrole.

Au-delà de 2030, le chemin vers la transition bas carbone dépend pour une large part de l'intensité de la coopération internationale dans la lutte contre le changement climatique.

Une meilleure intégration des efforts des différents pays doit permettre à la fois :

- d'accélérer la diffusion des technologies existantes, comme en témoigne la dynamique favorable des énergies renouvelables dont les coûts de production décroissent fortement ;
- de favoriser le développement de nouvelles technologies, d'en amortir le coût initial sur une assiette large et donc de faire profiter chaque pays d'économies d'apprentissage et d'échelle sous forme de baisses de prix ;

¹ OCDE (2017), *Investing in Climate, Investing in Growth*, éditions OCDE, Paris.

² New Climate Economy (2018), *Unlocking The Inclusive Growth Story of the 21st Century: Accelerating Climate Action in Urgent Times*.

³ Commission européenne (2018), *A Clean Planet for all. A European Strategic Long Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy*, novembre.

- d'éviter le risque de « fuites de carbone », inefficaces d'un point de vue climatique et pénalisantes pour l'économie française. Les secteurs les plus difficiles à décarboner sont aussi des secteurs très internationalisés – le transport de marchandises longue distance et certains secteurs industriels intensifs en énergie tels que la chimie, la sidérurgie et la cimenterie. Ce constat plaide pour le développement d'instruments communs au niveau européen (marché ETS, harmonisation de la fiscalité sur l'énergie, mécanisme d'inclusion carbone, etc.) et plus largement au niveau mondial pour les transports internationaux.

Le travail réalisé par cette commission est original et se veut précurseur, dans la mesure où la France a été l'un des tout premiers pays au monde à se doter d'une valeur tutélaire du carbone pour l'évaluation de ses investissements publics. Elle peut aujourd'hui étendre cette démarche dans le cadre plus général d'une valeur pour l'action pour le climat, au service d'une ambition forte de neutralité carbone. Les membres de la commission souhaitent que cette proposition de nouvelle trajectoire tutélaire du carbone soit utilisée dans les évaluations d'investissements et plus généralement des politiques publiques, et qu'elle alimente le débat sur les stratégies et les leviers d'action nécessaires à la réussite des objectifs du Plan Climat¹.

¹ À ce rapport s'ajoute une quinzaine de contributions réunies dans un volume intitulé *Compléments*, également disponible sur le site de France Stratégie.



DÉMARCHE, RÉSULTATS, USAGES

MESSAGES CLÉS ET RECOMMANDATIONS

Par l'Accord de Paris de 2015, les États signataires se sont fixé comme ambition collective de parvenir à la neutralité carbone, c'est-à-dire à l'équilibre entre émissions de gaz à effet de serre et capacités d'absorption des puits. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a récemment confirmé que cet objectif est nécessaire si l'on veut contenir le réchauffement climatique en deçà de 2 °C.

Pour contribuer à l'effort collectif indispensable, la France, dans le Plan Climat de juillet 2017, s'est fixé l'objectif « zéro émissions nettes » (ZEN) de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, les émissions brutes résiduelles ayant vocation à être absorbées par les puits de carbone que sont notamment les forêts, les prairies et à plus long terme les dispositifs technologiques de séquestration du carbone. Cet objectif est plus ambitieux que le « facteur 4 » (division par quatre des émissions) retenu en 2005 et à nouveau en 2015. Les actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre doivent donc être amplifiées dès maintenant car notre pays n'est pas sur la bonne trajectoire.

Pour sélectionner les actions pertinentes, il convient de leur donner une valeur socio-économique, c'est-à-dire une valeur du point de vue de la collectivité. La valeur de l'action pour le climat représente précisément la valeur monétaire que la collectivité donne aux actions permettant d'éviter l'émission d'une tonne équivalent CO₂ (CO₂e).

La valorisation des actions de lutte contre le changement climatique a été historiquement élaborée, sous l'appellation de valeur tutélaire, pour l'évaluation socioéconomique des investissements publics. Mais cette évaluation mérite d'être élargie à l'ensemble des actions possibles, pour fixer les bonnes priorités, encourager les actions utiles et les séquencer dans le temps.

En 2008, une première commission avait proposé une trajectoire de valeur tutélaire du carbone. Dix ans plus tard, une mise à jour de ces travaux s'avère nécessaire : les objectifs de politique climatique ont intégré le retard pris au niveau mondial dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la nécessité d'accroître les efforts ; les opportunités technologiques pour relever le défi climatique et les perspectives de

coopération internationale se sont précisées, même si un chemin important reste à parcourir.

Une valeur de l'action pour le climat fondée sur l'Accord de Paris et les engagements français

L'établissement d'une valeur de l'action pour le climat peut renvoyer à plusieurs logiques. La première, dite coûts-avantages, consiste à identifier la valeur du carbone qui égalise le coût marginal des dommages liés à l'émission d'une tonne de CO₂e et le coût marginal de la réduction de ces mêmes dommages. Cette logique, inspirée des travaux historiques d'Arthur Pigou sur les externalités, a été appliquée dès les premiers travaux sur le climat de William Nordhaus, puis reprise notamment dans [le rapport Stern](#) (2006). Elle conduit à calculer au niveau mondial le dommage subi par l'humanité du fait de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre, indépendamment du pays à l'origine de l'émission et de la localisation des dommages.

La démarche de cette commission relève d'une logique complémentaire de la précédente, dite coûts-efficacité. Celle-ci consiste à identifier la valeur d'une tonne CO₂e évitée à prendre en compte dans les décisions de l'ensemble des acteurs économiques pour que la France atteigne la neutralité carbone¹ à l'horizon 2050. Par rapport à une démarche de coûts-avantages, cette logique permet de s'affranchir des incertitudes sur l'évaluation des dommages, en se fondant sur un objectif reflétant les préférences collectives. La valeur tutélaire ainsi définie représente la valeur pour la société des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre permettant d'atteindre l'objectif de neutralité.

Pour conduire cette démarche, la commission s'est d'abord attachée à bien caractériser la portée des engagements français pour en déduire une trajectoire pertinente de valeur tutélaire.

L'objectif en flux d'émissions nettes d'abord

L'externalité climatique est une externalité de stock, liée au niveau de concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. C'est pourquoi la prise en compte de cette externalité s'exprime traditionnellement en budget carbone, c'est-à-dire en plafond d'émissions de CO₂e cumulées dans le temps à ne pas dépasser pour contenir l'élévation des températures. Le [cinquième rapport du GIEC](#) publié en 2013 et 2014 a

¹ Le terme de neutralité « carbone » couramment utilisé renvoie à un objectif de neutralité pour l'ensemble des gaz à effet de serre.

montré qu'en l'absence d'effort spécifique sur la réduction des émissions, le budget carbone mondial pour limiter à 2 °C la hausse des températures serait épuisé avant le milieu du siècle.

L'épuisement rapide des budgets carbone mondiaux conduit aujourd'hui à compléter les objectifs de stock – la gestion prudente d'un budget carbone pluriannuel – par un objectif en flux : « zéro émissions nettes » de gaz à effet de serre liées aux activités humaines. Cette logique en flux d'émissions nettes est désormais la norme :

- c'est la référence de l'Accord de Paris de 2015, dont la logique s'adosse aux travaux du GIEC ;
- c'est la référence du rapport spécial du GIEC sur la limitation du réchauffement climatique à 1,5 °C publié en octobre 2018 ;
- c'est la référence adoptée par la France, ainsi que plusieurs autres pays, notamment européens (Norvège, Suède, Portugal, Espagne, etc.). Dans le cas français, les émissions résiduelles émises jusqu'au « zéro émissions nettes » restent cohérentes avec la consommation du budget carbone à notre disposition, si celui-ci était défini sur la base de notre part dans les émissions mondiales¹.

L'horizon ensuite

La France se fixe un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, sans attendre la seconde moitié du XXI^e siècle. Cet horizon est en ligne avec l'Accord de Paris qui invite les pays développés à engager des efforts rapides. Il intègre le besoin d'action précoce pour « sortir du pétrole » et ne pas être pris au dépourvu en cas de mauvaise nouvelle. Il répond enfin à un souci d'équité internationale dans la lutte contre le changement climatique.

L'objectif « ZEN » de 2050 doit évidemment être compris comme un objectif qu'il faut tenir dans la durée, tout au long de la seconde moitié du siècle, ce qui suppose un découplage durable entre émissions de gaz à effet de serre et activités humaines.

Le découplage entre émissions et activités humaines enfin

L'ambition française est de tracer un chemin permettant de réussir la transition vers la neutralité carbone sans peser sur la croissance. Chercher à atteindre un objectif d'émissions en 2050 par une compression du PIB serait coûteux – en termes d'emploi et de pouvoir d'achat – et inefficace sur le plan climatique – si cela impliquait des « fuites de

¹ Sans préjuger de la manière dont pourraient être effectivement répartis les budgets carbone entre pays.

carbone », c'est-à-dire des relocalisations de la production dans des pays moins ambitieux sur le plan climatique, du fait de pertes de compétitivité.

La démarche retenue répond ainsi à deux exigences : parvenir à décarboner l'économie en réduisant les émissions de gaz à effet de serre par unité de PIB ; investir pour ce faire dans l'efficacité énergétique et les technologies décarbonées.

Depuis 1990, les émissions de gaz à effet de serre en France ont diminué de 15 % tandis que le PIB augmentait de près de 50 %. Ce résultat est lié, entre autres, aux actions de verdissement de notre *mix* électrique et aux efforts d'économie d'énergie qui commencent à payer. Il reflète aussi la tertiarisation de notre économie et le déclin de certains secteurs industriels. L'enjeu est d'amplifier cette tendance de baisse des émissions dans les trois prochaines décennies, ce qui suppose un effort important d'investissements et des changements des comportements.

Une valorisation de l'action pour le climat fondée sur le meilleur état de l'art

Force est de constater qu'il n'existe pas d'outil de simulation « clés en mains » générant mécaniquement une valeur de l'action de lutte contre le réchauffement climatique. La commission propose une estimation raisonnable fondée sur le meilleur état de l'art, en intégrant trois ingrédients essentiels.

Premier ingrédient : une littérature économique consacrée à la question centrale de la répartition des efforts de décarbonation dans le temps

La gestion d'un « budget carbone » conduit à recommander une trajectoire d'émissions et de valeur tutélaire du carbone permettant de respecter le plafond d'émissions en minimisant le coût des transitions économiques et sociales. Dans ce cadre, le niveau de la valeur tutélaire du carbone doit permettre de respecter l'objectif fixé ; son taux de croissance doit conduire à une bonne répartition des efforts dans le temps. La règle de Hotelling recommande dans sa version élémentaire une croissance de la valeur carbone au rythme du taux d'actualisation public, soit une valeur actualisée demeurant constante au cours du temps : à condition de partir d'un point initial suffisamment élevé pour garantir un effort total adéquat, cette valorisation uniforme des actions garantit leur bonne répartition dans le temps.

La commission a considéré que la règle de Hotelling était une référence pertinente à long terme, mais qu'il pouvait être légitime de s'en affranchir en début de période pour lisser la revalorisation de la valeur de l'action pour le climat.

Deuxième ingrédient : le recours à des simulations de modèles

Les modèles permettent d'objectiver la valeur de l'action pour le climat, en fonction de l'objectif fixé, d'une description fine des technologies, des comportements, des interactions entre la France et son environnement international.

Les modèles à dominante technologique permettent de définir une trajectoire représentant le coût de la réduction d'une tonne additionnelle de CO₂e, ce coût marginal d'abattement ayant vocation à croître dans le temps au fur et à mesure qu'il est nécessaire de mobiliser des technologies plus onéreuses. Les modèles macro-économiques, pour leur part, permettent d'explicitier les investissements et les changements de comportement nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone.

La commission a estimé que les modèles donnaient une perspective pertinente de la valeur carbone requise jusqu'à l'horizon 2030, voire 2040, ou de manière alternative jusqu'à une réduction d'émissions proche du « facteur 4 » (division par 4 des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990). La robustesse des résultats s'érousse cependant au fur et à mesure que l'on s'éloigne dans le temps, que le niveau d'émissions se réduit et que l'on s'approche du seuil où les réductions appellent des changements fondamentaux, non marginaux, que les modèles calibrés sur le passé ne savent plus prédire.

Troisième ingrédient : des exercices de prospective technologique ou technico-économique

Les exercices de prospective technologique, tels ceux conduits au niveau mondial par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ou au niveau français dans le cadre de la préparation de la stratégie nationale bas carbone (SNBC), permettent d'apprécier le potentiel de décarbonation de différentes technologies, leur vitesse de déploiement et leurs coûts éventuels. Pour atteindre un objectif de décarbonation complète, la valeur tutélaire du carbone doit prendre en compte un portefeuille de technologies structurantes et nécessaires pour décarboner certains usages concentrant les émissions résiduelles, même si elles n'ont pas atteint un niveau de maturité suffisant et restent donc relativement chères.

Des changements de grande ampleur pour atteindre l'objectif de « zéro émissions nettes »

Les travaux de modélisation montrent qu'il existe des marges importantes de décarbonation à des coûts modérés. Par exemple, l'optimisation des systèmes de transports publics, l'électrification de certains usages, le développement de certaines

énergies renouvelables thermiques ou la rénovation des bâtiments présentent, dans de nombreux cas, une bonne efficacité environnementale et un faible coût de la tonne de CO₂e évitée.

Mais décarboner en profondeur l'économie implique des changements de plus grande ampleur, dans un contexte où la structure des systèmes énergétiques n'évolue que lentement et où les émissions de gaz à effet de serre restent difficilement compressibles en deçà de certains seuils pour certains usages.

Les principaux enseignements qualitatifs de nos travaux sont les suivants :

- l'atteinte de l'objectif « zéro émissions nettes » passera à la fois par des économies d'énergie et par une décarbonation de l'énergie utilisée ;
- la décarbonation sera progressive et reposera pour une large part sur des investissements destinés à « verdier » le capital existant (logements, bâtiments tertiaires, véhicules, etc.) ou à constituer de nouvelles infrastructures (réseaux de chaleur, réseaux de borne de recharge électrique, transports collectifs, etc.) ;
- il existe des gisements d'abattement importants à coût nul ou faible permis par une plus grande sobriété, une plus grande efficacité énergétique, des gestes simples ou de petits investissements. Une fois ces gisements épuisés, et sauf rupture technologique, le coût des actions par tonne de CO₂e évitée augmentera au fur et à mesure que l'on progressera dans la décarbonation et qu'il faudra recourir à des technologies moins matures ;
- à l'horizon 2050, le secteur de l'énergie, déjà largement décarboné par le mix nucléaire-énergies renouvelables, pourra l'être complètement, voire devenir une source d'émissions négatives si est acquise la « faisabilité sociotechnique » du développement de la BioCSC (capture et stockage du carbone en sortie de centrales fonctionnant à la biomasse) ou de la capture directe de carbone dans l'air. Les émissions brutes résiduelles, que les puits de carbone devront permettre d'absorber, seront alors principalement le fait de l'agriculture et de quelques secteurs industriels.

Une valeur cible relevée à 250 € en 2030, cohérente avec les estimations internationales les plus récentes

La commission considère que l'horizon 2030 a vocation à constituer le point d'ancrage privilégié d'une trajectoire pluriannuelle de valeur de l'action pour le climat, pour deux raisons fondamentales :

- l'horizon 2030 – soit un horizon d'un peu plus de dix ans – est décisif pour « ancrer » les anticipations et déclencher une vague d'investissements « bas carbone » ;

- à cet horizon, les travaux de modélisation peuvent s’adosser à des éléments de prospective économique et technologique raisonnablement solides, même s’ils restent naturellement entourés d’incertitudes.

Sur la base des travaux de modélisation réalisés, la commission propose, en partant de 54 € en 2018, de retenir une valeur cible de l’action pour le climat de 250 €₂₀₁₈ en 2030.

Cette valeur est significativement plus élevée que celle du référentiel actuel issu des propositions de la commission en 2008 (100 €₂₀₀₈, soit 110 € en valeur d’aujourd’hui). Cela reflète principalement le retard pris et le relèvement corrélatif du niveau d’ambition au-delà du « Facteur 4 », qui impliquent des coûts d’abattement élevés dans plusieurs secteurs de l’économie, en particulier dans l’agriculture, certains secteurs industriels (le ciment, la chimie ou l’acier), et dans les transports de marchandises sur longue distance (par route, air ou mer). Les coûts d’abattement reflètent aussi le caractère encore insuffisant du niveau de coopération internationale et l’absence de mécanismes de flexibilité internationale sur lesquels pouvait tabler la commission de 2008.

Au-delà de 2030, la trajectoire proposée est le résultat de deux approches complémentaires :

- une prospective sur les coûts du portefeuille de technologies structurantes pour réussir la décarbonation. La commission n’a pas la prescience de l’arrivée d’une nouvelle technologie « *backstop* » miracle – c’est-à-dire d’une technologie permettant de se passer complètement des énergies fossiles pour un coût stabilisé. Elle ne postule pas davantage l’émergence d’un potentiel d’émissions négatives, c’est-à-dire d’une augmentation de la taille des puits de carbone telle que le budget carbone augmenterait et rendrait possible un relâchement des efforts. Mais elle considère qu’un portefeuille de technologies structurantes et variées (recours par exemple à un usage direct plus étendu de l’électricité décarbonée, ou à un usage indirect *via* le vecteur hydrogène, ou développement des gaz verts et de la biomasse) permettrait de parvenir à une décarbonation profonde moyennant des prix de bascule relativement élevés ;
- le calage progressif sur une règle de Hotelling. Entre 2030 et 2050, la croissance de la valeur tutélaire se réduit sensiblement pour se caler progressivement sur une règle de Hotelling pour un taux d’actualisation public de 4,5 %. Celle-ci garantit que la valeur des gains climatiques n’est pas « écrasée » par l’actualisation.

Au total, la commission recommande de retenir une valeur de 500 €₂₀₁₈ en 2040 et 775 €₂₀₁₈ en 2050. Ces valeurs sont dans la fourchette des valeurs du carbone les plus récentes recensées dans le dernier rapport spécial du GIEC d’octobre 2018.

La valeur de l'action internationale

La définition d'une trajectoire de valeur de l'action pour le climat doit prendre en compte les incertitudes qui entourent les évaluations, incertitudes qui vont croissantes au fur et à mesure que l'horizon s'allonge et que le champ des possibles technologiques et diplomatiques s'élargit.

Les analyses de sensibilité montrent que la trajectoire proposée repose sur des travaux de modélisation raisonnablement robustes à l'horizon 2030. Au-delà de 2030, nos analyses de sensibilité indiquent que les valeurs proposées pourraient être revues à la baisse si la coopération internationale permettait d'accélérer la production et la diffusion des innovations « vertes ».

La sensibilité des résultats au coût des technologies est, en effet, étroitement liée aux hypothèses de coopération internationale sous-jacentes. Au niveau industriel, des efforts de recherche et d'innovation davantage tournés vers des solutions de décarbonation auraient des effets puissants pour baisser le coût des technologies, comme on l'observe actuellement pour les énergies renouvelables. Lorsque plusieurs centres de recherche et entreprises de différents pays se lancent dans des programmes d'innovation, il en résulte à terme des gains pour chaque pays pris individuellement : chacun bénéficie en effet de l'apparition et de la diffusion mondiale des innovations et de la baisse des coûts des technologies permise par les effets d'apprentissage et les économies d'échelle.

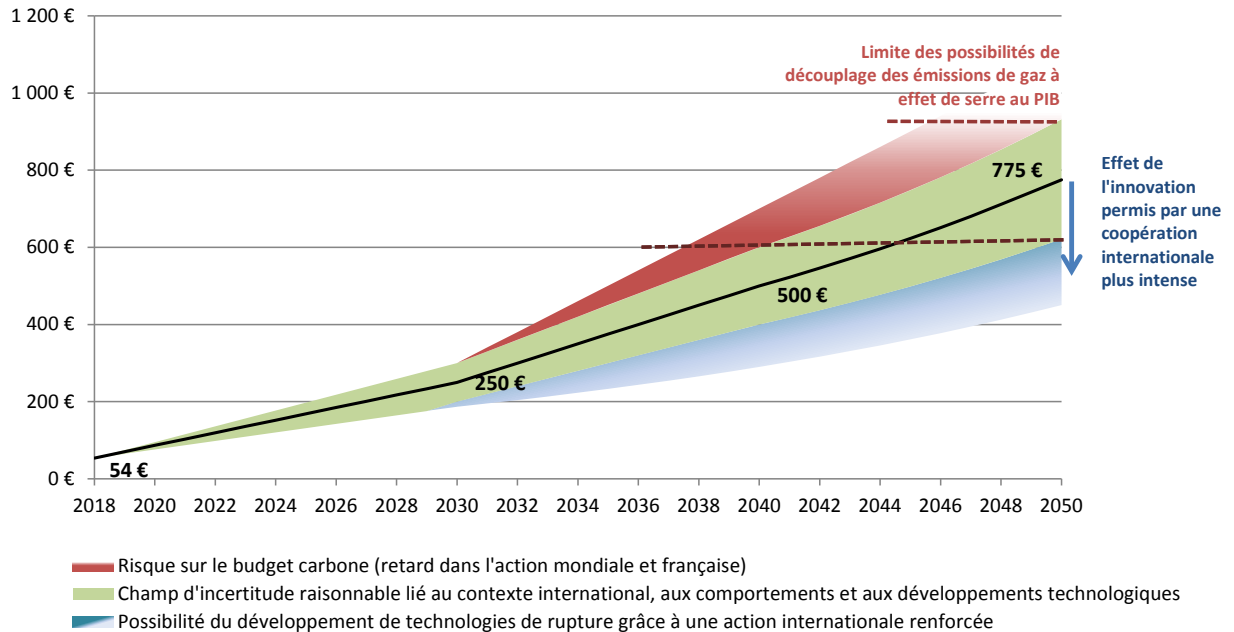
Au total, un scénario de rupture technologique permis par une coopération internationale plus intense aurait sans doute peu d'incidence sur la valeur tutélaire du carbone 2030 mais permettrait d'envisager une révision en forte baisse de cette valeur entre 2030 et 2050. Celle-ci pourrait s'établir aux alentours de 450 € à l'horizon 2050 dans ce scénario favorable.

L'incertitude sur les coûts des technologies d'atténuation (comme sur les dommages du changement climatique) renforce la nécessité d'une approche séquentielle où les politiques sont progressivement révisées au fur et à mesure que de l'information supplémentaire devient disponible. Cela a trois conséquences :

- cela renforce l'intérêt d'une valeur de l'action pour le climat, assurant la cohérence dans l'évaluation de toutes les options d'atténuation potentielle, sans faire de choix *a priori* ;
- cela implique que l'incertitude soit prise en compte dans la détermination de la valeur, ce que la trajectoire et les fourchettes qui l'entourent s'efforcent de faire, comme l'illustre le graphique ci-dessous ;

- cela implique aussi que la valeur ne soit pas fixée une fois pour toutes, mais soit révisée à échéances régulières – tous les cinq à dix ans – en fonction des nouvelles informations structurantes, en particulier sur les vrais coûts de l'atténuation.

La valeur de l'action pour le climat



Un usage universel de la valeur de l'action pour le climat

La transition vers une décarbonation profonde appelle à la fois des changements de comportement et des changements technologiques. Ceux-ci sont à notre portée, moyennant un éventail large d'actions, notamment de bons signaux de prix, un programme d'investissements permettant d'élargir le champ des usages décarbonés et un effort d'innovation au niveau mondial.

Aujourd'hui, tous les secteurs sont concernés. Parvenir à une décarbonation profonde de l'économie doit conduire à élargir « l'assiette » des actions publiques et privées de lutte contre le changement climatique, même si l'on sait que les gisements d'abattement sont très différents d'un secteur à l'autre, à la fois en termes de volume, de coût unitaire, de possibilité de substitution et de vitesse de décarbonation.

Aujourd'hui, tous les gaz à effet de serre sont concernés et pas seulement le CO₂. Les émissions de gaz à effet de serre portent en effet pour un quart d'entre elles sur les gaz autres que le CO₂. L'enjeu n'est pas seulement de réduire les émissions d'origine énergétique mais aussi les émissions liées aux procédés industriels, au traitement des déchets, à l'agriculture ou à l'usage des sols.

Une trajectoire pluriannuelle lisible pour rendre possibles les investissements et l'innovation

La clé d'une transition énergétique réussie repose sur la constitution d'un stock de capital permettant de créer de l'activité sans émettre de gaz à effet de serre. Comme de nombreuses études précédentes, notamment celles de l'OCDE, du New Climate Economy Project et de la Commission européenne¹, nos travaux confirment un besoin de redéploiement des investissements et des financements vers des projets décarbonés.

L'investissement net supplémentaire pour réussir la transition bas carbone représente jusqu'à 10 % des flux existants, dont une part doit par ailleurs être redirigée vers la formation de capital « vert ».

Nos travaux délivrent deux enseignements plus spécifiques :

- pour rendre possibles les investissements et les innovations, les acteurs publics et privés doivent disposer d'une trajectoire de valeurs lisible et stable qui serve « de boussole » à leurs anticipations et permette de les coordonner : chaque acteur doit dès à présent préparer la sortie du pétrole et anticiper l'épuisement des budgets carbone ;
- les investissements nécessaires relèvent d'abord d'une multitude de choix individuels, portant sur le logement, la mobilité, la production décentralisée d'énergie. Il est nécessaire de lever les différents freins traditionnels à l'investissement (insuffisance de R & D, accès limité à l'information et au crédit), de mobiliser la finance climat et d'organiser le bon partage des financements et risques technologiques entre public et privé.

Un guide pour l'action

La valeur de l'action pour le climat reflète à la fois l'ampleur du chemin à parcourir – représenté par le coût marginal d'abattement des émissions de gaz à effet de serre – et la valeur à donner aux actions permettant d'arriver au bout du chemin, c'est-à-dire de converger vers l'objectif ZEN.

¹ OCDE (2017), *Investing in Climate, Investing in Growth*, éditions de l'OCDE, Paris ; New Climate Economy (2018), *Unlocking The Inclusive Growth Story of the 21st Century*, *op. cit.* ; Commission européenne (2018), *A Clean Planet for all. A European Strategic Long Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy*.

Une référence pour déterminer les priorités collectives

La valeur de l'action pour le climat a pour vocation première de constituer la référence d'un cadre d'évaluation rénové permettant de répondre à quatre questions fondamentales :

- le pays est-il sur la « bonne » trajectoire de décarbonation, c'est-à-dire sur le chemin lui permettant d'atteindre *in fine* l'objectif ZEN ? La réponse à cette question relève d'un suivi quantitatif des flux d'émissions par secteurs et des puits de carbone ;
- la trajectoire observée permet-elle d'atteindre l'objectif fixé au meilleur coût ? C'est là que la valeur de l'action pour le climat intervient comme référence utile, dans la mesure où elle permet de définir le périmètre des actions pertinentes pour la collectivité. Une valeur plus élevée étend le champ des actions rentables pour la collectivité : à chaque instant, toutes les actions – publiques ou privées – qui coûtent moins cher que la valeur tutélaire du carbone, *i.e.* qui présentent un coût d'abattement socioéconomique inférieur à cette valeur, devraient être entreprises. Si ce n'est pas le cas, il convient d'identifier les freins et les verrous qui font obstacle à ces actions ;
- les actions sont-elles appelées par ordre de mérite ? De nombreuses actions sont à conduire pour atteindre l'objectif, mais elles doivent être engagées dans le bon ordre. Les gisements de réduction des émissions de CO₂e à bas coût doivent être mobilisés en priorité, avant que soient lancées les actions plus coûteuses. C'est l'intérêt d'une trajectoire pluriannuelle de valeur croissante dans le temps de guider le déclenchement en temps utile – ni trop tôt, ni trop tard – des actions efficaces, en tenant compte des délais de réalisation des investissements ;
- les actions sont-elles spontanément déclenchées par les acteurs privés ou nécessitent-elles une intervention publique ? Dans certains cas, les actions n'entraînent aucun coût et génèrent même parfois des gains. C'est notamment souvent le cas de choix de sobriété, de partage d'équipements ou de certains gestes d'efficacité énergétique. Dans d'autres cas, l'externalité n'est pas prise en compte et requiert une intervention publique prenant la forme d'investissements ou de mesures incitatives et réglementaires.

Une référence pour évaluer l'efficacité des actions sectorielles et des projets d'investissement publics

Dans ce cadre général d'évaluation, la valeur de l'action pour le climat gagnerait à être utilisée de manière systématique dans les évaluations socioéconomiques des projets. En effet, les différentes actions envisagées pour lutter contre le changement climatique présentent des rapports efficacité écologique-coûts économiques très dispersés. Plus

précisément, deux indicateurs clés permettraient d'utiliser la valeur de l'action pour le climat pour guider l'allocation des ressources rares de la société.

- Le premier, de portée générale, est le coût d'abattement socioéconomique, c'est-à-dire le coût complet (achat et usage) d'une action engagée pour abattre une tonne de CO₂e supplémentaire. La valeur de l'action pour le climat constitue une référence à laquelle les différents coûts d'abattement peuvent être comparés, les actions dont le coût d'abattement est inférieur à la valeur étant rentables pour la collectivité. Encore faut-il que les calculs de coûts d'abattement obéissent à des règles stables et transparentes, ce qui n'est pas encore le cas. Un travail de normalisation doit être réalisé.
- Le second, de portée plus spécifique, est le calcul de rentabilité socioéconomique des projets d'investissement publics. Dans ce cadre, la valeur permet d'orienter les projets en donnant une valeur monétaire aux émissions évitées. Les évaluations socioéconomiques des projets d'investissement publics obéissent à un jeu de règles bien établies, mais leur usage doit se diffuser au-delà de sa sphère traditionnelle d'application, constituée principalement des transports et des bâtiments publics.

La revalorisation de la valeur de l'action pour le climat doit s'intégrer dans une vision exhaustive de l'impact « climat » des projets. Au-delà de la révision à la hausse de la valeur tutélaire du carbone, il sera nécessaire de réviser l'ensemble du cadre d'évaluation : les scénarios de référence, la prise en compte du risque climatique dans le taux d'actualisation, celle de l'ensemble des impacts climatiques tout au long de la vie des projets. Ce travail de réévaluation doit permettre de mieux les hiérarchiser et de redéfinir en conséquence un programme d'investissements mieux aligné sur l'objectif ZEN.

Une référence pour anticiper les changements nécessaires

Une trajectoire pluriannuelle de valeurs, d'aujourd'hui à 2050, indique le chemin restant à parcourir pour « sortir des énergies fossiles » et doit inciter chaque acteur à anticiper cette sortie, à s'y préparer.

Au-delà de cet effet de signal, des mesures d'incitation ou de prescription sont souvent nécessaires pour favoriser le déclenchement des actions utiles lorsque celles-ci ne sont pas spontanément décidées par les acteurs privés. S'inscrivant dans l'approche retenue par l'OCDE et la commission Stern-Stiglitz¹, cette commission considère qu'il faut, en amont des mesures particulières, veiller au bon alignement des politiques publiques sur

¹ OCDE (2015), *Aligner les politiques publiques pour une économie bas carbone*, Publications de l'OCDE ; Commission Stern-Stiglitz (2017), *Report of the High-level Commission on Carbon Prices*.

l'objectif de lutte contre le changement climatique, notamment au niveau des politiques foncières, d'urbanisme et de transports.

Dans ce cadre réaligné, la décarbonation passe par la mobilisation d'un panel de mesures – tarification du carbone, subventions, mesures d'accès au crédit, partage des risques technologiques, réglementations –, chacune permettant de faire une partie du chemin. Il n'est pas possible de tabler sur une seule de ces mesures car chacune a sa zone de pertinence et ses contraintes. La tarification du carbone permet de soutenir la rentabilité des investissements « verts » et d'orienter les innovations dans la « bonne direction », mais elle est contrainte par ses effets redistributifs et par les risques de pertes de compétitivité industrielle. La réglementation permet d'atteindre un résultat de manière certaine, mais peut imposer des coûts de mise en conformité élevés pour certains acteurs et freiner l'innovation. Quant aux subventions, elles représentent un coût pour les contribuables et peuvent générer des effets d'aubaine.

La valeur de l'action pour le climat n'est pas « fléchée » sur une mesure particulière, et la commission ne prétend pas trancher la question de la bonne combinaison des mesures. Elle souligne qu'une attention particulière devra être portée à la gestion des transitions sociales et professionnelles : la politique de décarbonation engage le pays tout entier pour le très long terme et il est vital qu'elle puisse être largement comprise, partagée et soutenue.

Dans ce contexte, la commission recommande que l'on puisse évaluer, à l'aune de la valeur tutélaire du carbone, usage par usage, si la combinaison retenue est bien dimensionnée et rend possible le déclenchement des investissements bas carbone qui soutiennent l'activité. Cela relève d'un vrai travail d'évaluation car les différentes mesures se combinent sans qu'il soit possible d'additionner au sens strict les signaux-prix et les coûts implicites des normes. Mieux l'État connaîtra les coûts d'abattement des émissions de CO₂ par usage, mieux il pourra calibrer ses interventions pour faciliter le basculement vers des technologies décarbonées.

Pour permettre aux acteurs de s'approprier la nouvelle trajectoire de la valeur tutélaire et faciliter sa mise en œuvre, nous recommandons les actions suivantes

1. Officialiser dans les référentiels d'évaluation socioéconomique la trajectoire proposée de la valeur de l'action pour le climat, pour permettre à tous les acteurs de disposer d'une référence commune.

2. Faire de cette valeur la référence d'un cadre d'évaluation renforcé des actions de décarbonation.

- Normaliser, sous l'égide de France Stratégie, les règles de calcul des coûts d'abattement socioéconomiques, afin de pouvoir comparer les différentes actions sectorielles de décarbonation à la valeur de l'action pour le climat.
- Mieux prendre en compte, en sus de la décarbonation, les cobénéfices associés à la lutte contre le changement climatique : amélioration de la qualité de l'air et donc de la santé par réduction de la pollution locale, préservation et renforcement de la biodiversité ; meilleurs régimes alimentaires ; réduction de la sensibilité aux chocs pétroliers, voire avance technologique.
- Évaluer, sur la base de la trajectoire pluriannuelle proposée, l'ordre dans lequel ces actions ont vocation à être déployées pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050 de la manière la plus efficace possible, dans une logique de mise en cohérence des politiques publiques et d'accompagnement des transitions économiques et sociales.

3. Revoir le cadre de l'évaluation socioéconomique des investissements publics et en déduire un nouvel ensemble de projets.

Demander à France Stratégie de mettre à jour le cadre de l'évaluation socioéconomique des investissements publics pour :

- préciser le ou les scénarios de référence permettant d'atteindre l'objectif national de neutralité carbone, qu'il conviendra d'utiliser dans les évaluations de projets ;
- valoriser les projets publics en fonction de leur contribution à l'objectif de neutralité carbone et de leur « valeur d'option », *i.e.* de la flexibilité qu'ils apportent dans la mise en œuvre de la stratégie ;
- préciser le taux auquel il convient d'actualiser les coûts et les gains climatiques des projets, en tenant compte notamment de la corrélation entre les bénéfices des investissements de décarbonation et la croissance économique future ;
- mieux prendre en compte les émissions générées et/ou évitées pendant la phase de construction des projets dans l'évaluation, en plus de celles déjà comptabilisées pendant leur exploitation ;
- rendre disponibles à l'ensemble des acteurs publics (État, collectivités territoriales, autres) des méthodes d'évaluation socioéconomique pouvant être appliquées à tous leurs projets d'investissement publics, sachant que le respect de l'objectif de neutralité carbone reposera pour une large part sur l'agrégation d'un grand nombre de petits projets ;

- demander au Secrétariat général pour l'investissement de proposer, sur la base de ces évaluations mises à jour, un nouveau programme de projets de R & D et d'investissements publics.

4. Dimensionner en fonction de la valeur de l'action pour le climat les combinaisons possibles de mesures environnementales permettant de déclencher les actions jugées pertinentes pour la collectivité.

La valeur d'une baisse d'une tonne CO₂e des émissions est la même pour la société quel que soit le secteur où cette réduction a été réalisée. Elle donne une mesure de l'ampleur du chemin à parcourir, mais ne préjuge pas de la manière dont ce chemin doit être parcouru ni de la manière dont les efforts, en particulier financiers, doivent être répartis entre les différents acteurs publics et privés. Cette répartition mérite d'être clarifiée, avec notamment deux objectifs :

- évaluer par usage les enjeux de redistribution et de compétitivité associés à la mise en œuvre des actions de décarbonation ;
- prendre en compte ces enjeux dans la conception des politiques publiques, en particulier pour aider les acteurs sans alternative immédiate à sortir progressivement des solutions carbonées et pour éviter les « fuites de carbone » dans les secteurs exposés à la concurrence internationale.

5. Calculer une valeur de l'action pour le climat européenne, afin de révéler la signification d'un objectif de neutralité carbone au niveau européen.

Une valeur tutélaire européenne pourrait notamment servir pour l'évaluation des projets financés par la BEI ou par des fonds européens, pour évaluer les politiques européennes, dont le marché EU-ETS, et renforcer la coopération européenne.



LES CHIFFRES CLÉS

Budget carbone mondial

- Permettant de maintenir le réchauffement climatique sous les 2 °C avec une probabilité de 66 % : 1 320 GtCO₂e ;
- permettant de maintenir le réchauffement climatique sous les 1,5 °C avec une probabilité de 66 % : 570 GtCO₂e.

Source : Rapport SR 1,5 °C du GIEC, 2018

Tendances françaises 1990-2017

- PIB : + 47 %
- Émissions de gaz à effet de serre : – 15 %

Sources : Banque mondiale (PIB en volume) ; Inventaire des émissions de gaz à effet de serre – United Nations Framework Convention on Climate Change

Émissions françaises de gaz à effet de serre en 2017 (France, tous GES)

- 466 MtCO₂e (millions de tonnes de CO₂ équivalent)
- Soit 7 tCO₂e par habitant

Sources : CITEPA, indicateurs 2018 ; Insee

Les sources d'émissions de gaz à effet de serre (tous GES confondus)

- Énergie (production et usage) : 69 %
- Agriculture (hors énergie) : 17 %
- Procédés industriels : 10 %
- Traitement des déchets : 4 %

Source : calculs France Stratégie, à partir de données de la Direction générale de l'énergie et du climat, inventaire 2015 et des données des modèles

La part des secteurs économiques dans les émissions de CO₂ françaises d'origine énergétique (69 % des émissions de GES)

- Transport : 38 %
- Bâtiment : 21 %
- Industrie : 20 %
- Production d'énergie : 18 %
- Agriculture : 3 %

Source : calculs France Stratégie, à partir de données de la Direction générale de l'énergie et du climat, inventaire 2015 et des données des modèles

Émissions sous ETS/Émissions hors ETS

Le marché de permis d'émissions négociables couvre 45 % des émissions totales de gaz à effet de serre européennes et 23 % des émissions françaises.

Sources : Commission européenne et ministère de la Transition écologique et solidaire

Taille des puits de carbone

La taille actuelle des puits de carbone liés à l'utilisation des terres et leur changement et la forêt (UTCF) est évaluée à environ 40 MtCO₂e.

Source : Direction générale de l'énergie et du climat

La proposition de valeur de l'action pour le climat

- 2018 : 54 €₂₀₁₈/tCO₂e
- 2020 : 87 €₂₀₁₈/tCO₂e
- 2030 : 250 €₂₀₁₈/tCO₂e
- 2040 : 500 €₂₀₁₈/tCO₂e
- 2050 : 775 €₂₀₁₈/tCO₂e

Source : commission sur la valeur de l'action pour le climat



GLOSSAIRE

Approche coûts-bénéfices

Approche visant à déterminer simultanément la trajectoire optimale des réductions d'émissions de gaz à effet de serre et le coût de ces abattements d'émissions en égalisant, à chaque instant, le coût marginal d'abattement d'une tonne de gaz à effet de serre et valeur actualisée des dommages marginaux futurs d'une tonne de gaz à effet de serre émise aujourd'hui. La valeur du carbone assurant cette égalité est appelée dans la littérature anglo-saxonne « coût social du carbone » (*social cost of carbon*).

Approche coûts-efficacité

Approche visant à déterminer le coût minimal de réduction des émissions de gaz à effet de serre, pour un objectif de réduction des émissions fixé. La valeur de l'action pour le climat ou valeur tutélaire du carbone relève de cette approche.

Calcul socioéconomique

Calcul visant à évaluer l'intérêt d'un projet pour l'ensemble de la collectivité nationale.

Coût d'abattement

Écart de coût actualisé entre l'action de décarbonation et la solution de référence carbonée équivalente, rapporté aux émissions de gaz à effet de serre évitées par l'action.

Coût marginal d'abattement

Coût de réduction d'une unité (tonne) supplémentaire de gaz à effet de serre.

Décarbonation

Actions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Découplage des émissions du PIB

Réduction des émissions qui n'est pas réalisée grâce à une réduction du PIB.

Émissions anthropiques de gaz à effet de serre

Émissions de gaz à effet de serre relatives à l'activité humaine.

Marché EU-ETS

Marché européen de droits à polluer.

Neutralité carbone ou « zéro émissions nettes »

Les émissions brutes de gaz à effet de serre sont parfaitement compensées par l'absorption de carbone par les puits.

Rentabilité socioéconomique des investissements

Évaluation, en termes monétaires, de la rentabilité d'un investissement pour l'ensemble de la collectivité nationale. Les gains générés par la collectivité incluent les effets qui ne passent pas par le marché, notamment les effets sur l'environnement pour lesquels il n'existe pas de prix. Ils excluent les flux financiers qui constituent de simples transferts monétaires entre agents au sein de la collectivité nationale.

Taux d'actualisation socioéconomique

Taux utilisé dans les évaluations socioéconomiques pour actualiser les gains et coûts futurs d'un projet. Le taux d'actualisation socioéconomique est généralement inférieur au taux d'actualisation d'un investisseur privé.

Valeur de l'action pour le climat ou valeur tutélaire du carbone

Valeur que la collectivité donne aux actions permettant d'éviter l'émission d'une tonne équivalent CO₂e. Cette valeur est aussi appelée dans la littérature anglo-saxonne « prix fictif du carbone » (*shadow price of carbon*).



CHAPITRE 1

LE CONTEXTE MONDIAL : CE QUI A CHANGÉ DEPUIS DIX ANS

Depuis les travaux de la première commission sur la valeur tutélaire du carbone de 2008¹, le contexte mondial de la lutte contre le changement climatique s'est profondément transformé. La toile de fond est celle d'une dérive continue des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES). Le [cinquième rapport du GIEC](#) publié en 2013 et 2014 a contribué à préciser la réalité du changement climatique et ses conséquences protéiformes. Ses travaux montrent que le budget carbone à la disposition de l'humanité – c'est-à-dire notre marge d'émissions de GES – pour contenir la hausse des températures à 2 °C sera épuisé d'ici à trois décennies, voire avant si on veut contenir la hausse des températures à 1,5 °C².

Dans cette « course contre la montre », des progrès ont été enregistrés sur le front des technologies comme sur celui des politiques environnementales :

- le champ des possibilités technologiques de décarbonation s'est élargi, avec la forte baisse du coût des énergies renouvelables électriques, l'arrivée à maturité de technologies telles que la mobilité électrique, les perspectives ouvertes dans les domaines clés du stockage de l'énergie, de l'hydrogène, de la capture et stockage du CO₂ ;
- les politiques nationales de lutte contre le changement climatique ont progressivement gagné en ampleur et en consistance dans plusieurs régions du monde. D'après les statistiques de la Banque mondiale, 46 pays et 25 collectivités territoriales donnent un prix au carbone, sur une assiette représentant 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. En relançant le processus de négociation enlisé

¹ Centre d'analyse stratégique (2008), [La valeur tutélaire du carbone](#), rapport de la mission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.

² GIEC (2018), [Global Warming of 1.5 °C, Summary for Policymakers](#).

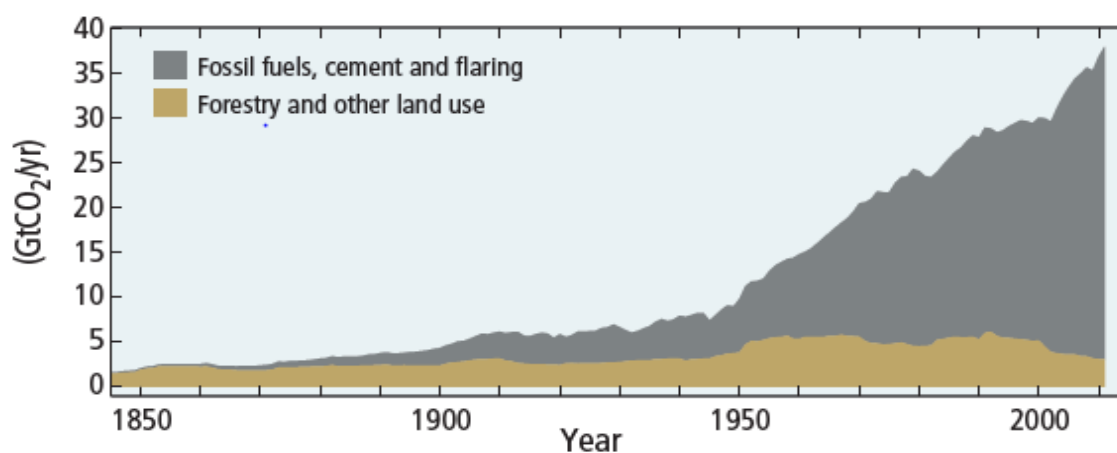
depuis la COP15 à Copenhague, l'Accord de Paris de 2015 a été l'occasion de renouveler l'engagement des 196 pays signataires à contenir la hausse des températures à moins de 2 °C.

Ce chapitre, sans prétendre restituer la complexité des débats sur les enjeux scientifiques, technologiques, économiques et sociaux du changement climatique, s'attache à caractériser les grandes évolutions internationales qu'une démarche nationale de valorisation du carbone doit nécessairement prendre en compte.

1. Le monde n'est pas sur la bonne trajectoire

Les émissions mondiales de GES ont entamé une croissance forte à partir des années 1950 (voir figure 1). Si cette croissance a marqué une pause relative pendant les années 1990, le développement des pays émergents, notamment des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud) a depuis entraîné une nouvelle accélération des émissions de GES.

Figure 1 – Émissions anthropiques mondiales de CO₂ par an et émissions de CO₂ cumulées par période



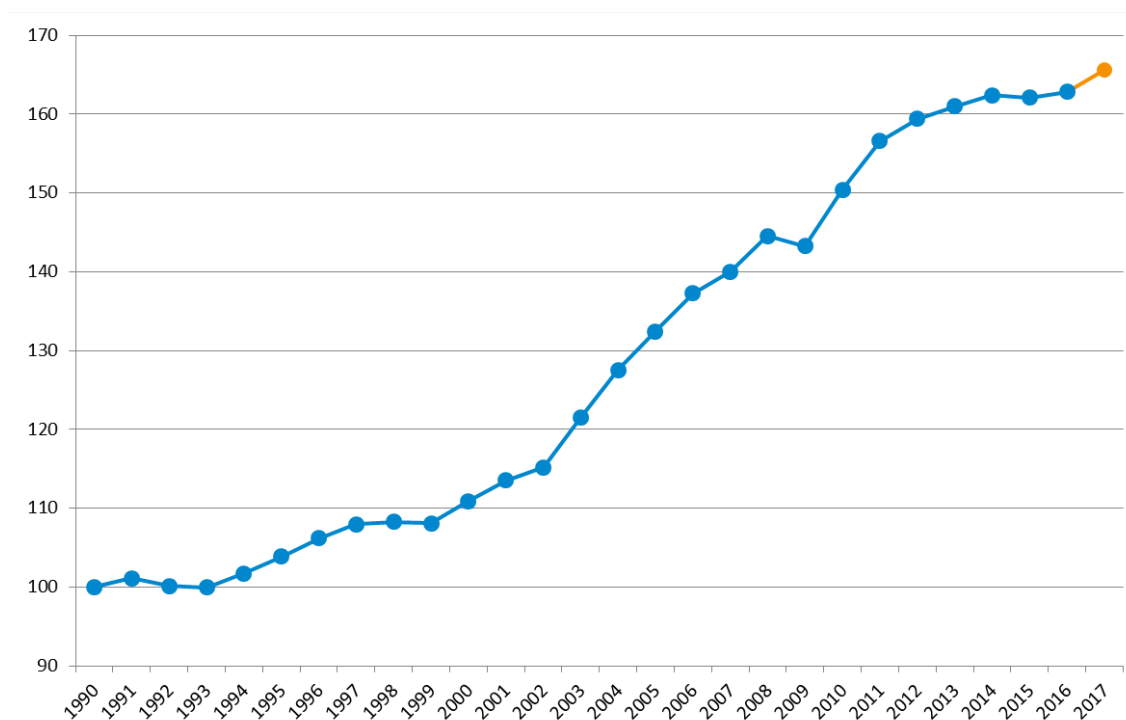
Lecture : en gris sont représentées les émissions liées à la combustion d'énergie fossile, aux activités de cimenterie et au torçage ; en brun figurent les émissions liées aux activités de foresterie et autres utilisations des sols.

Source : GIEC (2014), *Climate Change 2014, Synthesis Report, Summary for Policymakers*, p. 3

Malgré les politiques environnementales mises en œuvre, en Europe principalement, les émissions mondiales de GES n'ont cessé d'augmenter, sauf pendant la crise financière

de 2007-2008¹. Tous GES confondus et en incluant les secteurs des terres (usage des sols et foresterie), la hausse est proche de 70 % entre 1990 et 2018.

**Figure 2 – Croissance annuelle des émissions mondiales de GES
(base 100 en 1990)**



Sources : Corinne Le Quéré et al. (2018), *Global Carbon Project, Earth System Science Data*, 10, p. 405-448, (point orange : estimation) ; Canadell P., Le Quéré C. et al. (2018), « Carbon emissions will reach 37 billion tonnes in 2018, a record high », *The Conversation*, 5 décembre

1.1. Des risques de dommages graves et irréversibles

La responsabilité des activités humaines dans le réchauffement global est établie de manière plus rigoureuse. Le dernier rapport du GIEC affirme, plus nettement que les précédents, que le changement climatique a dès aujourd'hui des conséquences observables : « L'influence humaine sur le climat est clairement établie et les niveaux atteints par les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique sont les plus

¹ Entre 2008 et 2009, le PIB mondial calculé en dollars constants s'est réduit de 1,73 % et les émissions mondiales de GES ont baissé de 0,9 % (sources : World Development Indicators et Global Carbon Project).

hauts jamais constatés. Les récentes altérations du climat ont eu une gamme d'effets étendus sur les systèmes humains et naturels »¹.

Les rapports successifs du GIEC ont également documenté de manière de plus en plus précise les risques de dommages graves ou irréversibles courus par l'humanité. « La poursuite des émissions de GES aggravera le réchauffement et engendra des changements durables du système climatique, augmentant la probabilité d'impacts graves, répandus et irréversibles sur les personnes et les écosystèmes. »² Le changement climatique amplifiera les risques existants pour les systèmes naturels et humains et en créera de nouveaux : baisse des rendements agricoles, montée des eaux, recrudescence des événements extrêmes. Naturellement, les seuils à partir desquels ces risques pourraient se matérialiser sont difficiles à déterminer, de même que la localisation précise des dommages.

Encadré 1 – Les gaz à effet de serre

Les engagements de l'Accord de Paris portent sur sept GES (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆, NF₃). Les trois quarts des émissions de GES sont des émissions de CO₂.

Ces gaz se distinguent par leur durée de vie et leur pouvoir de réchauffement. Le pouvoir de réchauffement global (PRG) traduit l'impact d'un gaz donné sur le réchauffement climatique relativement au CO₂, à un horizon temporel donné (généralement 100 ans). Cela permet de convertir les masses des différents gaz en une unité unique, la tonne d'équivalent CO₂ (t CO₂e), qui représente la masse de CO₂ qu'il faudrait pour générer le même impact sur le réchauffement climatique qu'une tonne du gaz considérée.

Ainsi, à horizon de 100 ans, une tonne de méthane a un pouvoir réchauffant global de 25, ce qui signifie qu'une tonne de méthane émise aujourd'hui contribue autant au réchauffement climatique mesuré dans 100 ans que 25 tonnes de dioxyde de carbone émises aujourd'hui. Une tonne de méthane correspond donc à 25 t CO₂e.

¹ « Human influence on the climate system is clear, and recent anthropogenic emissions of greenhouse gases are the highest in history. Recent climate changes have had widespread impacts on human and natural systems », GIEC (2014), *Climate Change 2014, Synthesis Report, Summary for Policymakers*.

² « Continued emission of greenhouse gases will cause further warming and long-lasting changes in all components of the climate system, increasing the likelihood of severe, pervasive and irreversible impacts for people and ecosystems », *ibid.*

Tableau 1 – Les gaz à effet de serre : durée de vie, pouvoir de réchauffement, répartition et source d'émissions

		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	Gaz fluorés			
					HFC	PFC	SF ₆	NF ₃
Concentration atmosphérique	2014	397 ppm	1 823 ppb	327 ppb	> 157 ppt	> 6,5 ppt	8,2 ppt	< 1 ppt
	2005	379 ppm	1 774 ppb	319 ppb	> 49 ppt	> 4,1 ppt	5,6 ppt	-
Durée de vie approximative dans l'atmosphère		*	9	131	de quelques semaines à plusieurs milliers d'années			
Pouvoir de réchauffement global, cumulé sur 100 ans		1	25	298	[124 ; 14 800]	[7 390 ; 12 200]	22 580	17 200
Emissions mondiales de GES par substance (en % des émissions totales 2010)		74	17	7	2			
Source des émissions anthropiques		Combustion de ressources fossiles, procédés industriels, déforestation	Déchets, agriculture et élevage, procédés industriels	Agriculture, procédés industriels, engrais	Sprays, réfrigération, procédés industriels			Fabrication de composants électroniques

ppm : partie par million

ppb : partie par milliard

ppt : partie par trillion.

Remarque : un million de tonnes de carbone (1 MtC) = 3,664 millions de tonnes de CO₂.

* La durée de vie du carbone ne peut pas être représentée par une seule valeur car ce gaz n'est pas détruit au fil du temps, il migre entre les océans, l'atmosphère et le système terrestre. Une part de l'excès de CO₂ est absorbée rapidement (par la surface des océans, par exemple), mais une autre restera dans l'atmosphère pendant plusieurs milliers d'années du fait de la lenteur du processus transférant le carbone aux sédiments océaniques.

Sources : *Chiffres clés du climat, France, Europe et Monde, éditions 2016 et 2018, CGDD et I4CE, Datalab, ministère de la Transition écologique et solidaire* ; *United States Environmental Protection Agency Climate Change Indicators: Greenhouse Gases*, www.epa.gov/climate-indicators/greenhouse-gases ; *United States Environmental Protection Agency Climate Change Indicators: Global Greenhouse Gas Emissions Data*, www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data ; *World Development Indicators, Banque mondiale* ; *CITEPA*, www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/effet-de-serre/perfluorocarbures

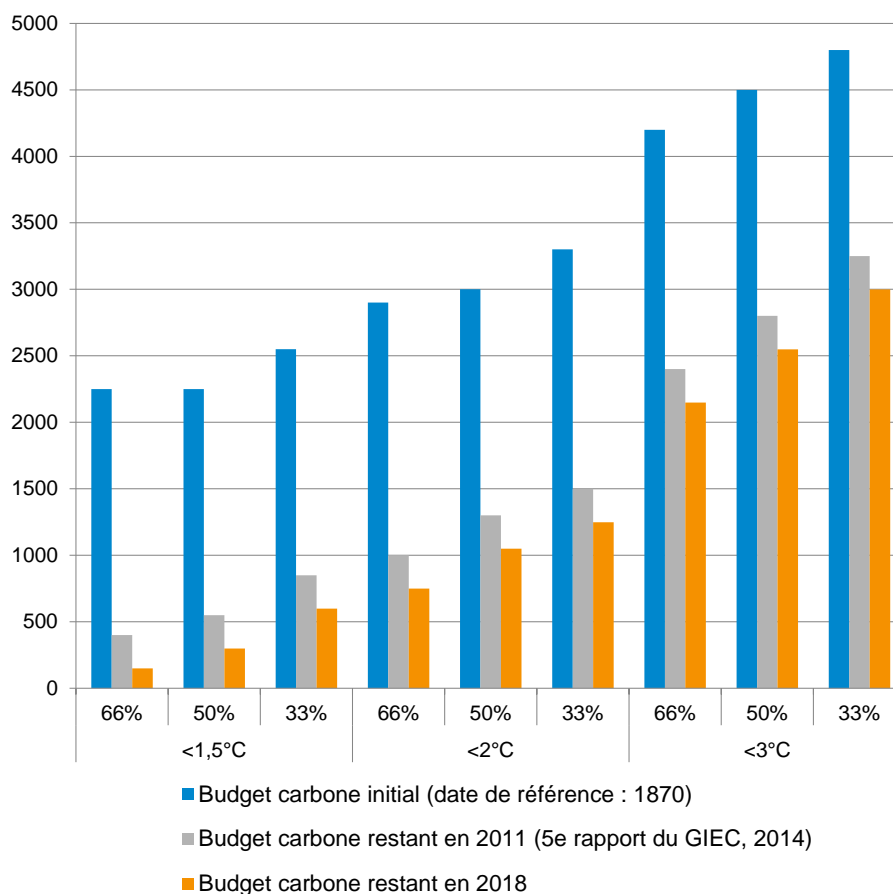
1.2. Un budget carbone mondial en épuisement rapide

Le budget carbone se définit comme la quantité totale de carbone qui peut être émise pour une hausse maximale donnée des températures (1,5 °C ou 2 °C), afin de rester en-deçà de cette limite avec une probabilité donnée. Compte tenu des incertitudes des modèles climatiques, pour une cible en température et une probabilité données, la mesure du budget carbone reste elle-même entourée d'incertitudes et constitue un objet récurrent de débats. Ce rapport n'a pas pour objet de rendre compte de ces débats ni *a fortiori* de prendre position, mais de caractériser les messages généraux qui émanent de l'ensemble des travaux rassemblés et synthétisés par le GIEC.

Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC de 2014 et son rapport spécial sur la cible 1,5 °C, tout juste paru, explicitent les enjeux d'une limitation de la hausse de la température moyenne à la surface du globe « largement en deçà » de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle, avec 1,5 °C comme étant plus souhaitable :

- l'horizon se compte désormais en décennies. Une grande partie du budget carbone dont nous disposons au début de l'ère industrielle a été déjà consommée (voir figures 3 et 4) ; les budgets carbone résiduels seront épuisés bien avant la fin de ce siècle, et bien avant que les gisements d'énergies fossiles soient épuisés ;

Figure 3 – Budget carbone initial et budgets carbone restants en 2011 et en 2018



Source : calculs de France Stratégie à partir de GIEC (2014), *Climate Change 2014. Synthesis report*, p. 64

- le budget carbone, c'est-à-dire le stock d'émissions de GES à ne pas dépasser, s'épuisera d'ici deux à trois décennies au rythme des émissions actuelles, si l'on veut contenir le réchauffement en-deçà de 2 degrés¹ ;
- la lutte contre le changement climatique et la cible de 2 °C imposent donc de tenir un « zéro émissions nettes » d'ici la seconde moitié du XXI^e siècle, en d'autres termes de contenir les émissions brutes au niveau des puits de carbone ;
- les économies doivent converger entre aujourd'hui et la seconde moitié du XXI^e siècle vers un « zéro émissions nettes » soutenable si la cible est 2 °C. Si l'objectif est de limiter la hausse des températures à 1,5 °C, la neutralité doit être atteinte au niveau mondial en 2050.

Si l'on entre dans le détail des scénarios du GIEC, le nombre de décennies encore disponibles dépend de l'objectif de température, de la probabilité que l'on se donne de ne pas dépasser cet objectif. Il dépend aussi de choix méthodologiques sur la période considérée et de la taille estimée des puits de carbone (océans et forêts, notamment).

Le cinquième rapport du GIEC de 2013-2014 montre que les budgets carbone compatibles avec une hausse des températures contenue à 2 °C seraient épuisés d'ici trois décennies. À partir des résultats du cinquième rapport du GIEC portant sur les budgets carbone calculés en 2011, il est possible d'estimer le budget carbone à notre disposition aujourd'hui, selon l'objectif climatique. Pour mettre à jour les estimations de 2011, on intègre au calcul les émissions entre 2011 et 2017 (voir tableau 2).

¹ Le rapport 1,5 °C du GIEC précité mentionne la possibilité, avec des risques, de dépassement temporaire du budget carbone puis, grâce aux technologies de capture et stockage du CO² (CSC), de revenir sur des trajectoires compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris.

Tableau 2 – Budgets carbone

Cible du réchauffement climatique	< 1,5 °C			< 2 °C			< 3 °C		
	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %
Probabilité de respect des objectifs de hausse des températures	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %
Budget carbone initial (date de référence 1870)	2 250	2 250	2 550	2 900	3 000	3 300	4 200	4 500	4 800
Budget carbone restant en 2011 (Cinquième rapport du GIEC, 2014)	400	550	850	1 000	1 300	1 500	2 400	2 800	3 250
Budget carbone restant en 2018	153	303	603	753	1 053	1 253	2 153	2 553	3 003
Années restantes avant dépassement du budget au rythme actuel des émissions (hypothèse de 37 GtCO ₂ /an)	4	8	16	20	28	34	58	69	81

Sources : calculs de France Stratégie à partir de GIEC (2014), *Climate Change 2014. Synthesis report*, p. 64 ; d'une présentation de K. Anderson du Tyndall Center for climate change research ; et de Le Quéré C. et al., *Global Carbon Budget 2018, Earth Syst. Sci.*

Le récent rapport spécial 1,5 °C du GIEC révisé à la hausse les budgets carbone qui sont allongés d'une dizaine d'années, sur des bases méthodologiques différentes des précédents rapports¹.

Tableau 3 – Budgets carbone AR 5 (cinquième rapport du GIEC) et SR 1.5 (Rapport spécial 1,5 °C) restants en 2018

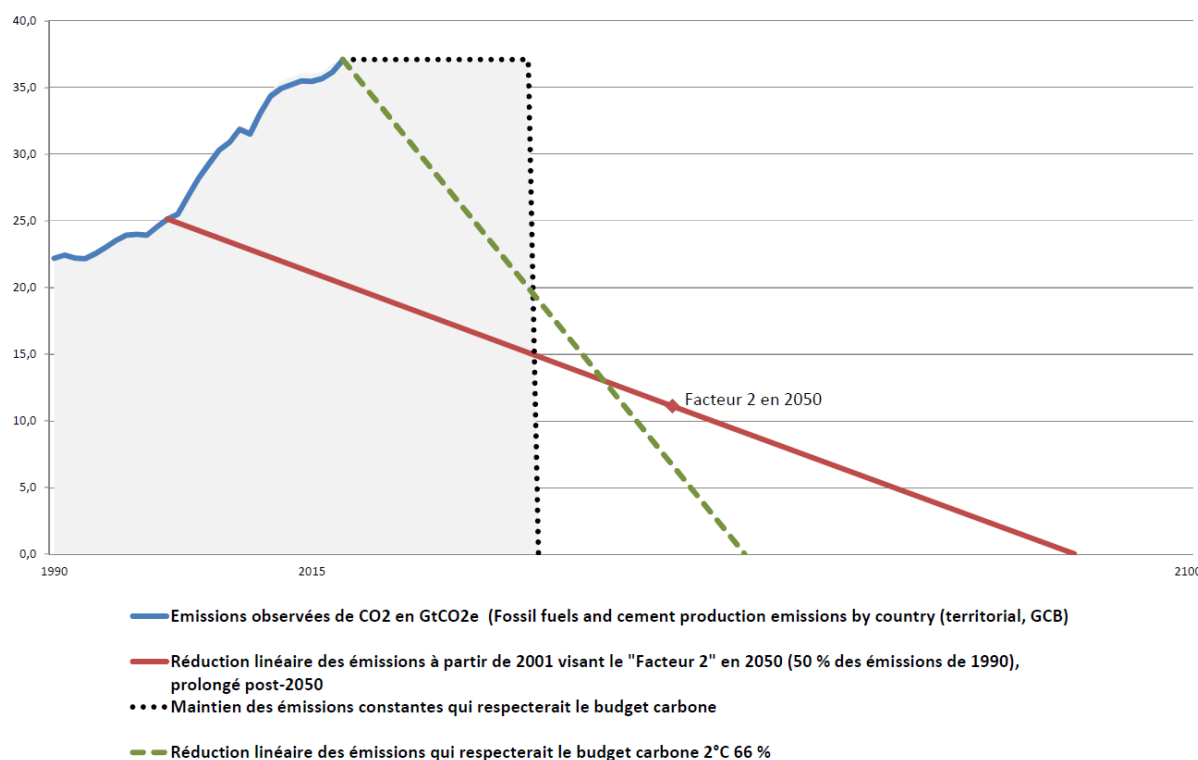
Cible du réchauffement anthropique	AR5						SR 1.5					
	<1,5 °C			<2 °C			<1,5 °C			<2 °C		
Probabilité de respect des objectifs de hausse des températures	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %
Budget carbone restant en 2018	153	303	603	753	1 053	1 253	420	580	840	1 170	1 500	2 030

Sources : calculs de France Stratégie à partir de GIEC (2014), *Climate Change 2014, Synthesis report*, tableau 2.2, p. 64, et GIEC (2018), *SR 1.5, chapitre 2, table 2.2, p. 22*

¹ La révision à la hausse du budget carbone est à considérer avec prudence, car il existe un grand nombre d'incertitudes.

Au total, au-delà des incertitudes, le message général peut être synthétisé de manière stylisée dans le graphique ci-dessous : nous ne sommes pas sur la bonne trajectoire, les émissions mondiales augmentent et le budget carbone se réduit. Dans un tel contexte, atteindre la neutralité carbone – zéro émissions nettes de puits de carbone avant la fin du siècle – devient logiquement le nouvel ancrage des stratégies de lutte contre le changement climatique.

Figure 4 – Comparaison des objectifs mondiaux avec des trajectoires respectant le budget carbone 2 °C (avec une probabilité 66 %)



Source : simulations de France Stratégie à partir de United States Environmental Protection Agency Climate Change Indicators: Global Greenhouse Gas Emissions Data

1.3. Les scénarios du GIEC pour atteindre la neutralité carbone

Dans son rapport spécial 1,5 °C publié en octobre 2018, le GIEC considère qu'il faudrait atteindre un « bilan nul » des émissions aux alentours de 2050. Cela signifie que les émissions restantes devraient être compensées en éliminant du CO₂ de l'atmosphère. Dans cette perspective, il met en évidence dans son résumé pour décideurs quatre scénarios types (de P1 à P4) permettant de limiter la hausse des températures à 1,5 °C. Ces scénarios se différencient selon deux critères : la demande d'énergie et la taille des puits de carbone. Plus la demande d'énergie est forte, plus il faut augmenter la taille des puits en recourant à la capture et la séquestration du carbone, et plus le coût marginal

d'abattement des émissions est élevé car les technologies de capture et stockage du CO₂ (CSC) sont chères.

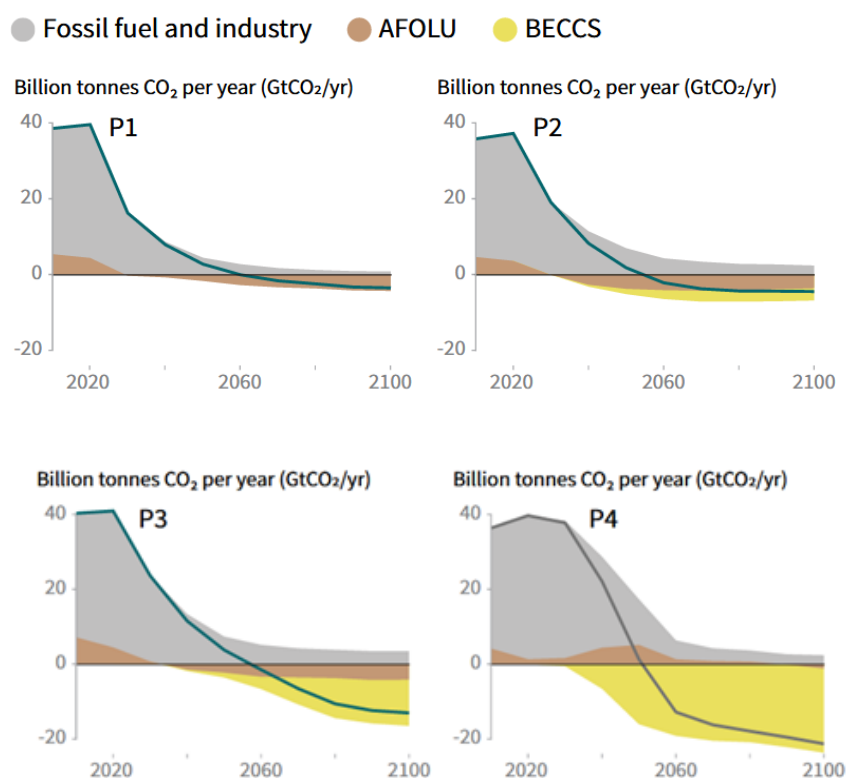
- Dans les scénarios P1 et P2, la demande d'énergie finale décroît ou est stable (relativement à 2010). Dans ce contexte, la neutralité carbone peut être obtenue par abattement des émissions brutes et par recours aux puits de carbone naturels que sont notamment les forêts et les prairies permanentes, sans mobilisation significative des technologies CSC. Le scénario P2 suppose toutefois une coopération internationale accrue.
- Dans les scénarios P3 et P4, la demande finale d'énergie croît. La baisse des émissions brutes est plus difficile et plus lente et la température dépasse transitoirement la limite de 1,5 °C (*overshoot*). La neutralité carbone nécessite, outre les puits naturels, de recourir aux puits de carbone artificiels. Parmi les technologies CSC, le GIEC prend comme technologie critique la BioCSC¹ qui permet la réalisation d'émissions négatives² :
 - la solution BioCSC permet des émissions nettes négatives de CO₂. Les émissions de CO₂ issues de la combustion de la biomasse sont capturées et enfouies, tandis que le stock de biomasse se renouvelle (lorsqu'on coupe un arbre pour obtenir du bois-énergie, on en replante un autre) ;
 - plus le potentiel de BioCSC est élevé, plus la marge de manœuvre sur les émissions brutes est grande. Un recours massif à la BioCSC est lui-même conditionné à une coopération internationale accrue.

Seuls les deux premiers scénarios n'impliquent pas des situations de dépassement temporaire de la cible (« *overshooting* »), dont la correction ultérieure est conditionnée au développement de technologies CSC.

¹ La BioCSC est l'utilisation de la biomasse comme intrant énergétique et dont les émissions CO₂ sont capturées et séquestrées.

² Les scénarios P2 et P4 soulignent l'importance de la coopération internationale qui permet d'arriver à une neutralité carbone plus rapidement, en 2050. Une coopération internationale accrue joue un rôle majeur dans les transferts financiers et technologiques.

Figure 5 – Caractéristiques de quatre scénarios types de réduction des émissions



Lecture : AFOLU signifie agriculture, foresterie et autre utilisation des terres ; BECCS est l'acronyme anglais pour BioCSC.

Source : GIEC (2018), *Global Warming of 1.5 °C, Summary for Policymakers*, p.16

2. Le champ des opportunités technologiques s'est élargi

Le changement climatique appelle un changement des modes de vie, des habitudes et d'une partie des actifs et des technologies que nous utilisons aujourd'hui. Depuis une dizaine d'années, le champ des opportunités technologiques s'est sensiblement élargi, même si les incertitudes restent importantes sur les vitesses de déploiement et les coûts des innovations.

2.1. Un avenir technologique plus prometteur

L'Agence internationale de l'énergie (AIE), dans ses travaux pour le secteur de l'énergie (*World Energy Outlook* et *Energy Technology Perspectives*¹), met en évidence le

¹ www.iea.org/weo, www.iea.org/etp.

portefeuille des technologies critiques qui devront être déployées à grande échelle au niveau mondial pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris.

Ce portefeuille se composera d'abord des technologies permettant de gagner en efficacité énergétique dans tous les secteurs de l'économie. Les technologies digitales joueront un rôle clé, par exemple, *via* les capacités de gestion en temps réel et de régulation qu'elles procurent pour améliorer l'efficacité énergétique des logements, bâtiments tertiaires et usines, et pour optimiser l'usage des réseaux. L'utilisation des technologies digitales pourrait aussi entraîner une augmentation du niveau de consommation de l'énergie, dans une proportion qui dépendra de l'utilisation et de la réglementation de ces usages, pour les véhicules autonomes par exemple¹.

Le portefeuille a ensuite vocation à couvrir l'ensemble des technologies existantes et futures permettant de décarboner l'énergie. À ce titre, le rapport de l'AIE *Energy Technology Perspectives 2017* précise que trois évolutions joueront un rôle critique :

- la décarbonation de la production d'électricité, avec les progrès conjoints des énergies renouvelables variables électriques (éolien et solaire PV), des moyens pilotables décarbonés (hydroélectricité, nucléaire, biomasse) ou bas carbone (fossile avec CSC), et l'amélioration des capacités de stockage de l'électricité ;
- l'électrification des usages : soit par un usage direct plus étendu de l'électricité décarbonée dans le transport, le bâtiment et l'industrie ; soit par un usage indirect *via* le vecteur hydrogène produit de façon décarbonée à partir d'électricité et d'électrolyse de l'eau. Le vecteur hydrogène peut lui-même avoir un usage direct (des piles à combustible par exemple) ou un usage indirect dans des carburants et gaz de synthèse (« power to liquid » et « power to gas ») ;
- le développement des bioénergies, notamment des biocarburants de nouvelle génération.

Ce portefeuille inclura enfin des technologies de capture et de stockage du CO₂, notamment de la BioCSC. La BioCSC permettra potentiellement de générer des émissions négatives, donc de compenser les émissions résiduelles difficiles à abattre de certains procédés industriels et agricoles, ainsi que du transport maritime et aérien.

Quatre enseignements principaux émanent du rapport de l'AIE :

- le champ des technologies de décarbonation s'élargit, même s'il est imprudent aujourd'hui de miser sur l'apparition d'une technologie « backstop » sans contrainte de développement majeur et permettant de se passer complètement des énergies

¹ Agence internationale de l'énergie (2017), *Energy and Digitalization*, Publications de l'AIE, octobre.

fossiles. Certains secteurs seront longs et difficiles à décarboner. C'est le cas du transport aérien et du transport maritime de marchandises. C'est le cas aussi de certains secteurs industriels comme la cimenterie, la sidérurgie et la chimie. Dans ces différents secteurs, il faut tabler soit sur des technologies de rupture (comme l'hydrogène) soit sur le développement des technologies de capture et de stockage du CO₂ pour parvenir à une décarbonation significative ;

- en l'état actuel des informations disponibles, les coûts des technologies les plus structurantes pour parvenir à une décarbonation totale en fin de période sont potentiellement élevés, pouvant atteindre entre 500 € et 800 € la tonne de CO₂ éliminée. Les coûts des technologies évoquées ici ne tiennent pas compte des coûts de déploiement et d'ajustement du stock de capital, si bien que les coûts marginaux d'abattement peuvent être plus élevés que les coûts des technologies *stricto sensu* ;
- le rapport *Energy Technology Perspectives 2017* (ou rapport ETP) souligne l'importance qui doit être accordée à la coopération internationale. Les innovations ont d'autant plus de chances d'émerger et de diffuser qu'un grand nombre de pays et d'entreprises engagent des politiques d'innovation destinées à « verdir » leurs activités. Des économies d'apprentissage et d'échelle devraient alors permettre des baisses plus rapides et plus importantes du prix des technologies¹. La coopération multilatérale peut favoriser ce processus d'innovation « schumpétérien » et permettre aux pays en développement un accès plus aisé aux technologies vertes ;
- enfin, le rapport ETP souligne l'interdépendance des technologies². « Combiner différentes technologies permettra de fournir des services énergétiques fiables et abordables, tout en réduisant les émissions. »

Ces travaux de l'AIE sont corroborés par d'autres travaux scientifiques. À titre illustratif, un complément du rapport résume un article récent de la revue *Science* réalisé par un

¹ Voir les *Compléments* au présent rapport pour des simulations des effets d'apprentissage et leurs conséquences sur les coûts de réduction de la tonne de CO₂ : Complément 14, « Valeur tutélaire du carbone : quelques considérations technico-économiques », par François Dassa et Jean-Michel Trochet.

² Cet argument concerne l'ensemble des secteurs : de l'énergie à l'industrie en passant par le secteur agricole et la foresterie. L'AIE insiste : « Les technologies énergétiques sont interdépendantes et doivent donc être développées et déployées en parallèle » (Rapport ETP 2017, voir le Complément 12 au présent rapport) et « *A significantly strengthened and accelerated policy response is required to achieve a low carbon energy future. Early action to reduce emissions and avoid lock-in of emissions intensive infrastructure will be essential if future temperature increases are to be kept to 2 °C or below. The scale of effort needed to achieve carbon neutrality by 2060 in the B2DS highlights that there would be almost no room for delay; all available policy levers would need to be pulled, and soon.* » (Rapport ETP 2017, p. 20).

réseau d'une trentaine de scientifiques et synthétisant les marges de progrès technique telles qu'on peut les apprécier aujourd'hui¹.

2.2. Des incertitudes importantes sur les coûts des technologies à l'horizon 2050

L'élargissement du champ des possibilités technologiques constitue une bonne nouvelle potentielle dans la lutte contre le changement climatique, mais celle-ci doit être intégrée « sans naïveté » dans un exercice de prospective, pour deux raisons.

En premier lieu, le progrès technique n'est pas spontanément « vert » et dépend pour une large part des signaux de prix – l'incitation à rechercher des substitutions aux énergies fossiles est tributaire de l'évolution constatée et anticipée de leur prix² – ainsi que de l'efficacité des politiques publiques de soutien au bien public que constitue la R & D. Celles-ci doivent surmonter les effets de « dépendance au passé » qui poussent les entreprises à chercher dans les domaines où elles disposent déjà de connaissances solides.

En second lieu, les incertitudes sur le potentiel de développement des nouvelles technologies et sur leurs coûts marginaux restent fortes. Parmi ces incertitudes figure le potentiel de capture et de séquestration du CO₂ (CSC) qui détermine la taille des puits de carbone et donc la marge disponible pour « absorber » les émissions brutes. Le procédé de CSC consiste à piéger ces molécules avant, pendant ou après l'étape de combustion afin d'éviter sa libération dans l'atmosphère. Les expérimentations en cours, probantes au plan technique, doivent être poursuivies au niveau des démonstrateurs, pour atteindre la taille industrielle requise. Par ailleurs, d'autres obstacles restent à franchir : il pourrait, par exemple, être nécessaire de déployer un réseau interconnecté entre les pays européens pour acheminer le CO₂ vers les zones de séquestration en mer du Nord, où les potentiels de stockage semblent les plus prometteurs. De façon plus générale, il reste à lever l'incertitude des lieux potentiels majeurs de séquestration³.

¹ Davis S. J *et al.* (2018), « [Net-zero emissions energy systems](#) », *Science*, vol. 360, Issue 6396, eaas9793.

² Dechezleprêtre A. (2016), « [How to reverse the dangerous decline in low-carbon innovation](#) », *The Conversation*, 24 octobre.

³ Agence internationale de l'énergie (2017), *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*, p. 31 et suivantes. Le CSC contribue pour 14 % de la réduction des émissions pour passer du scénario RTS (Reference Technology Scenario) au scénario 2DS (2 °C Scénario) et pour 32 % lors du passage de 2DS à B2DS (Beyond 2 °C Scénario), soit pour environ 18 % de RTS à B2DS.

Un champ d'incertitudes plus systémique porte sur le potentiel de développement de chaque technologie. Chaque solution technique rencontre en effet des limites :

- ces limites peuvent être à la fois physiques et énergétiques. Les ressources physiques disponibles doivent exister en quantité suffisante, comme l'eau pour l'hydroélectricité, des poches souterraines pour le CSC, les petits métaux¹ pour la fabrication de sources d'énergie décarbonée. L'accès et la production de ressources nécessitent en outre une dépense énergétique croissante malgré les évolutions des techniques de production². Ce contenu en matière et en énergie des nouvelles technologies de l'énergie est à prendre en compte dans l'évaluation carbone des produits technologiques « verts », car leur impact net sur les émissions de GES peut être inférieur à leur impact « brut »³. La compréhension et l'évaluation de cette boucle énergie-matière est essentielle pour considérer l'apport des technologies et donc la valeur de l'action pour le climat ;
- les nouvelles technologies, efficaces en matière énergétique, peuvent générer des « effets rebonds », soit la tendance à utiliser davantage des équipements plus efficaces – effets importants dans le domaine de la mobilité et, dans une moindre mesure, du logement ;
- les limites peuvent enfin tenir aux conflits d'usage : la biomasse par exemple peut faire l'objet d'usages multiples (alimentation, séquestration, besoins thermiques, etc.) qui nécessitent des arbitrages sur l'usage des sols. Les limites peuvent aussi, dans un même ordre d'idées, porter sur l'acceptabilité, comme en témoignent certaines oppositions au déploiement d'éoliennes terrestres.

Ces incertitudes sont renforcées par la persistance et même le creusement de l'écart entre les objectifs affichés des politiques d'atténuation nationales et internationales,

¹ Appelés également métaux critiques, stratégiques ou encore rares, au prix de quelques nuances. Ces métaux, contrairement au fer ou à la bauxite, sont produits en petites quantités et sont moins présents dans l'écorce terrestre. Ils sont particulièrement recherchés pour leurs propriétés et leurs applications dans les nouvelles technologies de l'énergie.

² Cet effet renvoie au second principe de thermodynamique. Il peut être approché par le taux de retour sur investissement énergétique (ou EROI). L'EROI mesure la quantité d'énergie utilisable par unité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie. Il calcule la difficulté à extraire l'énergie de l'environnement. Il établit que l'énergie nette disponible pour les activités humaines décroît. Il en est de même pour les productions des ressources métalliques : il faut de plus en plus d'énergie pour produire des ressources métalliques qui serviront à la production d'EnR. Voir Court V. et Fizaine F. (2017), « Long-term estimates of the energyReturn-on-investment (EROI) of coal, oil, and gas global productions », *Ecological Economics*, 138 (2017), p. 145-159.

³ Le concept d'énergie grise peut être mobilisé. Il désigne l'énergie incorporée à laquelle on ajoute l'énergie utilisée au déploiement du bien, à son exploitation jusqu'au recyclage du bien en fin de vie.

d'une part, et les résultats effectifs de ces politiques, d'autre part. Si cet *implementation gap* reste encore à analyser en détail, il traduit clairement la présence d'importantes barrières à l'action – au moins à court terme – liées notamment à trois enjeux :

- le traitement des questions redistributives associées aux politiques climatiques, dans un contexte où les acteurs n'ont pas toujours d'alternatives décarbonées à leur disposition, est soumis à des contraintes d'accès au crédit ou de compétitivité ;
- les verrous sociaux et institutionnels au déploiement rapide des options « bas carbone », par exemple pour la rénovation énergétique du bâtiment, avec des enjeux de formation professionnelle ou de structuration des filières au niveau de l'offre, ou de dilemme locataire/propriétaire au niveau de la demande ;
- le déficit de financement, dans un contexte où l'épargne disponible est abondante mais s'investit insuffisamment dans les actions « bas carbone » car les risques perçus restent élevés ; dans un contexte aussi où les marges de manœuvre budgétaires sont limitées. La question est donc de trouver les moyens de mieux orienter l'épargne privée vers l'investissement « bas carbone ».

3. L'économie du climat fournit le cadre d'une atténuation efficace du changement climatique

Ce rapport n'a pas la prétention de décrire l'ensemble du cadre théorique et les débats qu'ont suscités chez les économistes l'analyse des conséquences du changement climatique et les conditions d'une politique d'atténuation efficace. Il s'agit ici de faire ressortir les progrès réalisés depuis une dizaine d'années, progrès sur lesquels peut s'appuyer la démarche de valorisation de l'action pour le climat.

3.1. L'analyse économique de l'atténuation d'une externalité globale

L'économie de l'environnement aborde le climat sous l'angle d'un bien collectif à préserver ou sous l'angle d'une externalité négative (émissions de CO₂) à internaliser dans le fonctionnement des marchés. Il s'agit d'une externalité particulière, car le réchauffement climatique est provoqué par l'accumulation de GES dans l'atmosphère. Les dommages sont donc liés aux stocks de GES et non aux flux d'émissions qui les alimentent (comme dans les externalités classiques). Corrélativement, réduire la concentration prend beaucoup de temps.

Dans ce contexte, l'approche coûts-bénéfices du problème climatique vise à déterminer la trajectoire socialement optimale d'émissions de GES au niveau mondial, en égalisant à tout instant le coût marginal d'abattement d'une tonne de GES et la somme actualisée des dommages marginaux futurs d'une tonne de GES émise aujourd'hui. Lorsque

l'égalité est obtenue, on s'assure contre deux risques : celui de faire des efforts démesurés avec un bénéfice social faible, celui de ne pas faire suffisamment d'effort alors que le coût à supporter est faible pour un bénéfice important.

Cependant, l'analyse coûts-bénéfices reste difficile à décliner de manière opérationnelle dans la mesure où le calcul est très sensible aux choix de certains paramètres-clés (la valorisation des dommages, l'actualisation, les effets de seuil, etc.) encore mal connus ou relevant de la prospective¹ :

- la difficulté de ce type d'approche tient notamment à l'estimation de la courbe de dommage marginal, sur laquelle il est difficile d'obtenir un consensus². Les travaux du GIEC ont largement consolidé des risques catastrophiques³, mais la détermination précise des seuils de concentration au-delà desquels il y a rupture (*tipping points*) reste très incertaine ;
- les effets des variations de température sur l'économie sont difficiles à valoriser. Une partie de ces dommages présente un caractère marchand – perte potentielle de PIB en raison de la limitation des ressources naturelles et de la destruction de capital productif en cas de catastrophe. Mais une autre partie, non marchande, concerne la perte de biodiversité et les risques de destruction de sociétés et d'écosystèmes ;
- les conséquences de l'incertitude sont amplifiées par la présence de nombreuses inerties, voire d'irréversibilités, tant dans le système climatique que dans les systèmes techniques, économiques et sociaux.

Malgré ces limitations, les analyses coûts-bénéfices les plus détaillées, comme celles réalisées avec le modèle PAGE développé par Chris Hope et l'université de Cambridge⁴, et utilisé notamment pour le rapport Stern⁵, ou réalisées avec des modèles simples très agrégés comme le modèle DICE développé par William Nordhaus⁶ ont joué un rôle important dans la prise de conscience de l'ampleur du problème, et du coût de l'inaction, dans la définition de politiques d'atténuation efficaces.

¹ Voir l'encadré 2.

² De façon un peu provocatrice, Robert Pindyck avance que « when it comes to the damage function, we know virtually nothing – there is no theory and are no data that we can draw from » ; Pindyck R. (2017), « The use and misuse of models for climate policy », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 11(1), p. 100-114.

³ Voir la contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du GIEC, 2014.

⁴ Hope C., Anderson J. et Wenman P. (1993), « Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE model », *Energy Policy*, 21 (3), p. 327-338.

⁵ Stern N. (2006), *Stern review: The Economics of Climate Change*, United Kingdom.

⁶ Nordhaus W. D. (1993), « Reflections on the economics of climate change », *Journal of Economic Perspectives*, 7(4), p. 11-25.

3.2. Une « boîte à outils » pour atteindre l'objectif de décarbonation au meilleur coût

En complément ou en substitution de l'analyse coûts-bénéfices, une seconde démarche consiste à se donner un objectif d'émissions ou de concentration de GES, puis à déterminer la trajectoire d'atténuation optimale pour atteindre cet objectif au moindre coût.

Cette démarche, dite coûts-efficacité, permet de s'affranchir d'un exercice de valorisation et d'actualisation des dommages, dans la mesure où la courbe de dommage marginal est remplacée par une cible d'émissions. Sa pertinence repose sur une bonne appréciation des coûts marginaux d'abattement, c'est-à-dire des coûts de réduction des émissions de GES liés notamment au portefeuille de technologies disponibles et prévisibles.

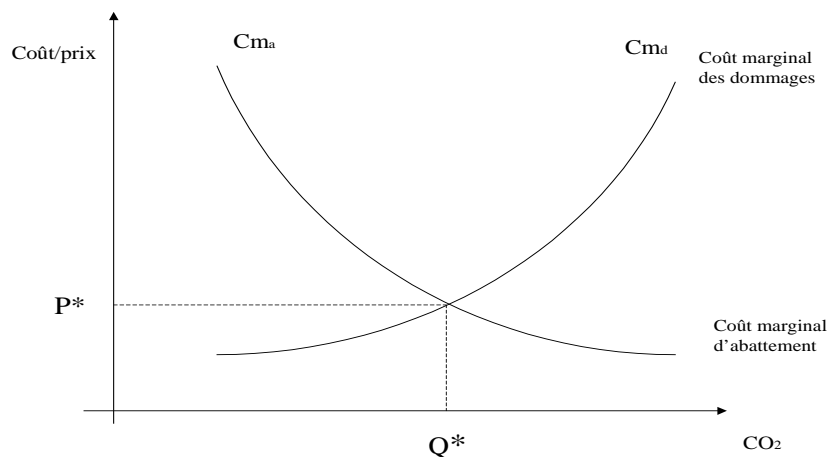
Encadré 2 – L'approche coûts-bénéfices et l'approche coûts-efficacité

L'approche coûts-bénéfices

Dans cette approche, l'efficacité commande de minimiser le coût complet du changement climatique – constitué des coûts d'abattement des émissions et du coût des dommages résiduels – et d'en déduire la trajectoire optimale des émissions. Cette approche conduit à assurer à tout moment l'égalité entre le coût marginal des dommages associés à l'émission d'une tonne supplémentaire de CO₂ dans l'atmosphère et le coût marginal de réduction des émissions de CO₂.

Ce principe constitue le socle de l'analyse coûts-avantages. C'est ce qu'illustre le graphique simplifié ci-dessous, où sont représentées la courbe du coût marginal des dommages et la courbe du coût marginal d'abattement. Plus la concentration de CO₂ est importante, plus le coût des dommages résultant d'une émission supplémentaire augmente ; plus on diminue la concentration de CO₂, plus le coût marginal d'abattement augmente. L'égalisation des coûts marginaux permet de dégager une quantité optimale d'émission Q* et le prix qui lui est lié p*.

Figure 6 – Approche coûts-bénéfices

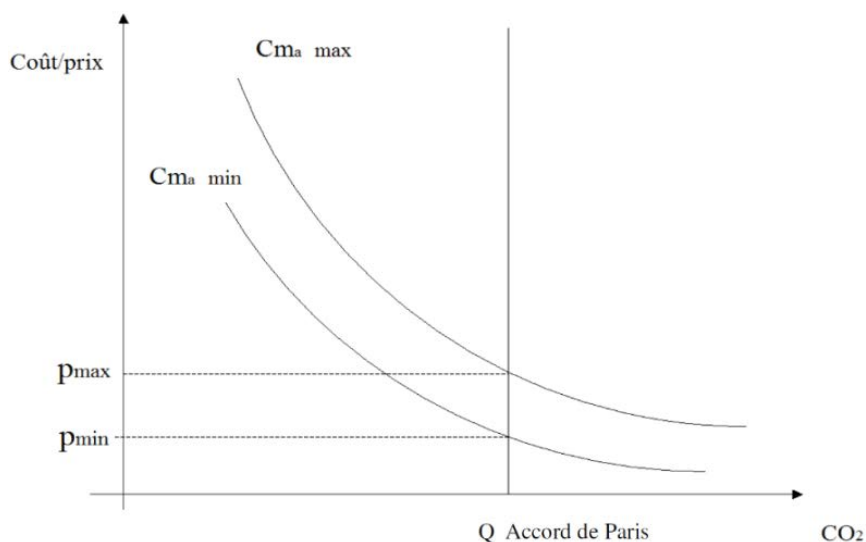


Source : France Stratégie

L'approche coûts-efficacité

Une seconde approche consiste à définir *ex-ante* un objectif de réduction des émissions situé dans les plages de valeurs raisonnables issues de l'analyse coûts-avantages. L'analyse économique peut, une fois l'objectif défini au niveau politique, prendre en compte cette cible et travailler sur le seul volet coûts-efficacité.

Figure 7 – Approche coûts-efficacité



Source : France Stratégie

La valeur d'équilibre dépend principalement de deux variables :

- le niveau des objectifs de réduction des émissions. Plus l'objectif est ambitieux plus le coût marginal d'abattement est élevé ;
- les technologies disponibles pour réduire les émissions. Plus les technologies sont performantes, plus les coûts marginaux d'abattement sont faibles.

Complémentarité des approches

Chaque approche a ses mérites et ses difficultés :

- l'approche coûts-bénéfices suppose que l'on puisse estimer et actualiser les flux de dommages issus du réchauffement climatique à partir d'hypothèses de concentration atmosphérique de GES et de hausse des températures. Les controverses qui ont entouré la publication du rapport Stern témoignent de la sensibilité des résultats aux différents paramètres retenus, notamment le calibrage de la relation entre températures et dommages, et au taux d'actualisation ;
- l'approche coûts-efficacité impose de déterminer un scénario-cible de réduction des émissions et de simuler la chronique de valeurs pour y parvenir. L'une des difficultés réside dans la modélisation des courbes d'apprentissage sur les technologies et des hypothèses sur les innovations futures.

Ces deux approches sont complémentaires. L'approche coûts-bénéfices cherche à définir le niveau optimal de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'approche coûts-efficacité à associer à un objectif donné une valeur carbone représentative des coûts marginaux d'abattement. *In fine*, si le niveau de réduction est fixé au niveau optimal, les valeurs du carbone données par les deux approches doivent converger.

Dans ce cadre, l'analyse coûts-efficacité fournit quelques éléments structurants pour définir une trajectoire pluriannuelle de valeur du carbone qui soit compatible avec le respect des objectifs climatiques :

- la valeur du carbone dépend principalement du niveau d'ambition fixé, des technologies de décarbonation accessibles pour atteindre cette ambition, ainsi que du niveau de coopération internationale. Toutes choses égales par ailleurs, un objectif plus exigeant conduit à mobiliser des technologies plus chères – ce qui pousse à la hausse la valeur du carbone. À l'inverse, des anticipations favorables sur le déploiement et les coûts futurs des technologies de décarbonation conduisent à réduire le besoin d'effort initial.

- la pente de la trajectoire d'une valeur carbone répond à une logique d'optimisation d'une ressource naturelle épuisable. Le prix d'une ressource naturelle épuisable va logiquement croître au fur et à mesure de sa consommation du fait de sa rareté croissante. Plus spécifiquement le détenteur de la ressource va arbitrer à chaque période entre laisser la ressource dans le sous-sol ou l'extraire et placer les revenus sur les marchés financiers. S'il connaît au départ les réserves disponibles et les prix futurs, le propriétaire devrait extraire sa ressource de telle sorte que la rente de la ressource non renouvelable (prix de vente moins coût d'extraction) augmente au rythme du taux d'intérêt. De même, dans le cas du carbone, le budget fixé s'épuise progressivement, comme une réserve de matières premières. Pour consommer cette marge, il doit être équivalent d'émettre ou d'abattre une tonne de CO₂ aujourd'hui ou dans un an, ce qui implique que la valeur de la tonne de CO₂ progresse comme le taux d'actualisation. Cette règle, dite de Hotelling, préserve l'avenir car elle garantit que la valeur actualisée du carbone reste constante et n'est pas écrasée par la valeur du temps.

Cependant, la version la plus simple de la règle de Hotelling n'épuise pas la question du choix de la répartition des efforts de décarbonation dans le temps.

Des arguments économiques plaident pour un rythme de croissance de la valeur inférieur au taux d'actualisation et par conséquent, à objectif climatique inchangé, pour une valeur initiale plus élevée :

- *la prudence* : à l'instar d'un ménage prudent accumulant une épargne de précaution quand ses revenus futurs deviennent plus incertains, il peut être socialement désirable d'augmenter l'effort initial d'abattement pour s'offrir une « épargne de précaution » dans un contexte de forte incertitude initiale, quelle que soit son origine, pour absorber les mauvaises nouvelles ;
- *la dynamique de l'innovation* : le déploiement précoce de technologies matures permet *via* des effets cumulatifs (de type rendements d'échelle croissants, *learning by doing*, etc.) de réduire dans le futur des coûts d'abattement.

D'autres arguments plaident à l'inverse pour une plus grande progressivité des actions :

- une action précoce peut occasionner des coûts élevés en raison des possibilités d'adaptation immédiate des acteurs économiques. Le capital existant et les investissements déjà engagés pourraient se trouver en situation d'obsolescence rapide (avec un risque de « coûts échoués »). Les réallocations d'emplois rendues nécessaires seraient importantes, avec à la clé des enjeux de transition professionnelle. Des solutions de substitution ne seraient pas systématiquement disponibles ;

- la maîtrise des effets redistributifs entre secteurs et entre acteurs plaide aussi pour une progressivité des efforts. Il convient en effet de tenir compte de l'exposition de certains secteurs à la concurrence internationale, de la vulnérabilité spécifique de certains ménages et de leur accès inégal aux alternatives décarbonées.

Si ces principes guident la réflexion, l'économie du climat ne fournit pas une recette « clés en mains » car beaucoup d'incertitudes demeurent. Les progrès de la modélisation permettent de calibrer des ordres de grandeur raisonnables. Cependant, trois familles de paramètres manquent aujourd'hui pour disposer d'une représentation suffisamment fine des interactions entre économie et lutte contre le changement climatique :

- la mesure des effets de diffusion internationale (*spillovers*) des innovations. Un effort mondial coordonné favoriserait l'émergence d'une masse critique d'innovations vertes et, *via* les effets d'apprentissage et d'échelle, permettrait à chaque pays de bénéficier en retour d'un accès plus large et moins coûteux à des technologies de décarbonation efficace. Pour autant, on ne dispose pas à ce stade d'une représentation bouclée de ces effets de diffusion permettant de calibrer l'effet d'un progrès technique mondial sur les coûts marginaux d'abattement ;
- les enjeux macroéconomiques des politiques climatiques, en particulier dès lors que l'on réfléchit à des efforts de très grande importance¹. La transition vers une économie bas carbone implique un effort d'investissement important – qui vient soutenir le PIB mais dont il faut assurer le financement. Pour minimiser le coût économique et social des transitions, il convient de quantifier le bouclage économique et financier induit par le besoin « d'investissements verts », les coûts potentiellement échoués sur les investissements polluants non amortis, l'ampleur des réallocations nécessaires, les mesures à prendre pour limiter les pertes de compétitivité et/ou les pertes de pouvoir d'achat des acteurs les plus exposés ;
- le niveau du taux d'actualisation qui gouverne la pente de la trajectoire pluriannuelle de valeur carbone. Au-delà du débat traditionnel sur les différents paramètres qui concourent à la formation du taux d'actualisation, la question de la prise en compte du risque, et plus spécifiquement de la corrélation entre risque économique et risque climatique, reste à ce stade non élucidée. Le « beta climatique »² d'un programme de

¹ Pour approfondir la réflexion sur ces enjeux, voir Tirole J. (2009), *Politique climatique, une nouvelle architecture internationale*, rapport n° 87 pour le Conseil d'analyse économique, et d'Autume A., Schubert K. et Withagen C. (2016), « Should the carbon price be the same in all countries? », *Journal of Public Economic Theory*, 18(5), p. 709-724.

² Le *beta* climatique mesure combien l'atténuation du changement climatique affecte le risque sur la consommation agrégée des générations futures (voir Dietz S., Gollier C. et Kessler L. (2018), « The climate beta », *Journal of Environmental Economics and Management*, 87, p. 258-274 ; Centre

lutte contre le changement climatique peut en effet venir augmenter ou minorer le taux d'actualisation selon la nature et le signe de la corrélation entre risque économique et risque climatique.

4. Le contexte institutionnel est plus porteur, même si la coopération internationale reste insuffisante

Les dernières années ont vu la construction d'outils opérationnels de lutte contre le changement climatique : au niveau de l'évaluation, avec l'élaboration de plusieurs référentiels sur la valeur du carbone ; au niveau des politiques environnementales avec la mise en place de signaux de prix et de réglementations. Ces outils opérationnels ont été développés dans un contexte de renforcement de la coopération multilatérale avec l'Accord de Paris de 2015.

4.1. L'Accord de Paris de 2015

Après les échecs successifs des différents accords climatiques comme le non-aboutissement de la démarche de la répartition des efforts à réaliser – ou *burden sharing*, qui revenait à se partager le budget carbone et les efforts à réaliser – lors de la Conférence de Copenhague, l'Accord de Paris est venu apporter un nouvel élan en faveur du climat¹.

Afin de « contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et [...] poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels », l'Accord de Paris a consacré l'ambition de la neutralité carbone. Les parties prenantes ont accepté de se conformer à un objectif de zéro émissions nettes dans le cours de la seconde moitié du XXI^e siècle.

Responsabilité commune mais différenciée et neutralité carbone sont évoquées dans l'article 4 de l'Accord de Paris : « les Parties cherchent à parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les meilleurs délais, étant entendu que le plafonnement prendra davantage de temps pour les pays en développement, et à opérer des réductions rapidement par la suite conformément aux meilleures données scientifiques disponibles de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions

d'analyse stratégique (2011), *Le calcul du risque dans les investissements publics*, rapport de la mission présidée par Christian Gollier.

¹ Le retrait américain qui prendra effet après le mandat du président actuel, n'a pas altéré la volonté des États à lutter contre le changement climatique.

anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle, sur la base de l'équité, et dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté. »

Par l'Accord de Paris, les États se sont alors engagés, à travers des contributions volontaires, les « *nationally determined contributions* » (ou NDC), à définir des stratégies climatiques nationales établissant un objectif de réduction de leurs émissions ou, pour certains pays émergents ou en développement, de limitation de leur intensité carbone. Ces NDC permettent de mesurer les contributions des États. Elles doivent être régulièrement révisées « à la hausse ». À ce jour, les mesures incluses dans les NDC conduiraient à une inflexion des émissions mondiales de GES mais ne permettent pas de se mettre sur une trajectoire de neutralité carbone¹ et restent donc insuffisantes.

En outre, l'Accord de Paris encourage les approches coopératives internationales (Article 6.4) entre les pays pour parvenir à l'objectif de neutralité carbone. Car avancer vers un monde avec zéro émissions nettes nécessite une coopération internationale pour faciliter les transferts de technologies bas carbone, de compétences, de financements, etc., qui peuvent encourager l'action pour le climat et la réduction de son coût.

4.2. L'élaboration de nouveaux référentiels de valeur du carbone

Plusieurs exercices de modélisation ont été conduits à l'échelle internationale et à l'échelle nationale par certains pays pour calculer des valeurs du carbone compatibles avec une ambition climatique définie. Ces valeurs relèvent soit d'une logique coûts-bénéfices – on parle alors de coût social du carbone (*social cost of carbon*) – soit d'une logique coûts-efficacité – on parle alors de prix fictif du carbone (*shadow price of carbon*), ou de valeur de l'action pour le climat.

Les valeurs internationales du carbone : les estimations du GIEC

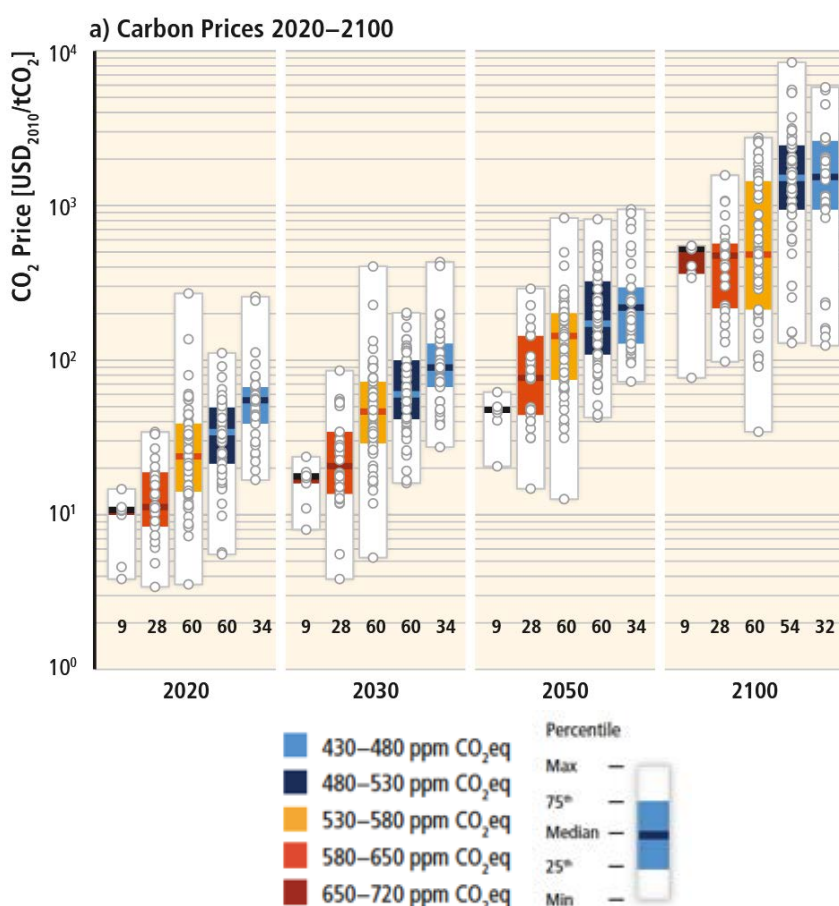
Dans son cinquième rapport, publié en 2014, le GIEC fournit des fourchettes d'estimation de prix du carbone, compris comme les coûts d'atténuation agrégés, fonction de la taille

¹ Voir par exemple la synthèse du Groupe interdisciplinaire sur les contributions nationales, publiée dans Benveniste H. O., Boucher C., Guivarch C., Le Treut H. et Criqui P. (2018), « Impacts of nationally determined contributions on 2030 global greenhouse gas emissions: Uncertainty analysis and distribution of emissions », *Environmental Research Letters*, 13(1), p. 1-10. Selon l'[Institut Climate Action Tracker](#) (consulté le 15 juillet 2018), le scénario « engagements » qui inclut les NDC déposées entre l'Accord de Paris et novembre 2017 anticipe – moyennant de nombreuses hypothèses sur l'évolution des émissions pays par pays post-2030 – un réchauffement de 3,16 °C ou plus avec une probabilité de 50 %. Ce scénario « engagements » anticipe un réchauffement compris entre 2,6 °C et 4 °C. La moyenne de 3,16 °C est proche des 3,4 °C de moyenne des tendances actuelles hors NDC.

du budget carbone fixé. Ainsi, la figure 8 montre que la minimisation des coûts d'abattement conduit à un prix du CO₂ (en \$₂₀₁₀) se situant :

- à l'horizon 2030, autour de 12 \$/tCO₂e pour un scénario 650-720ppm¹ et de 100 \$/tCO₂e pour un scénario 430-480ppm² ;
- à l'horizon 2050, autour de 15 \$/tCO₂e pour un scénario 650-720ppm et de 200 \$/tCO₂e pour un scénario 430-480ppm.

Figure 8 – Évolution des coûts globaux de l'atténuation dans le temps et selon le scénario d'émissions



Note : le nombre de scénarios considérés est indiqué en bas des barres.

Source : GIEC, Cinquième Rapport, working group III, chapitre 6, p. 450

¹ 650-720ppm (« parties par million ») CO₂e correspondent à un réchauffement improbable de 2 °C et plus probable qu'improbable de 3 °C au-dessus des températures préindustrielles.

² 430-480ppm (« parties par million ») CO₂e correspondent à un réchauffement plus improbable que probable de 1,5 °C et probable de 2 °C au-dessus des températures préindustrielles.

Le rapport spécial sur un réchauffement climatique global de 1,5 °C publié en octobre 2018 par le GIEC¹ présente les résultats d'exercices de modélisation simulant des fourchettes de prix du carbone obtenus dans le cadre d'une analyse coûts-efficacité. Ces prix – représentatifs des coûts marginaux d'abattement – varient substantiellement selon les modèles et les scénarios, et augmentent logiquement avec les efforts d'atténuation du réchauffement. Les fourchettes obtenues – qu'il faut comprendre comme des résultats de modèles – sont les suivantes :

Tableau 4 – Prix du carbone

Objectif de réchauffement	2030	2050	2070	2100
Inférieur à 2 °C (Higher-2 °C)	15-220 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}	45-1050 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}	120-1100 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}	175-2340 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}
Inférieur à 1,5 °C (Below-1.5 °C)	135-6500 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}	245-14300 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}	420-19300 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}	690-30100 \$ ₂₀₁₀ /tCO _{2e}

Source : GIEC (2018), *Special Report on Global Warming of 1.5 °C*, chapitre 2, p.152

Les valeurs du carbone utilisées au niveau national

Au Royaume-Uni, le Department of Energy and Climate Change (DECC), devenu depuis Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS), a publié en 2009 une valorisation du carbone, fondée sur une approche coûts-efficacité. La cible de long terme définie par le Climate Change Committee (CCC) est une réduction de 80 % en 2050, par rapport à 1990 (l'objectif étant cohérent avec un accroissement des températures anticipé à 2 °C, avec très peu de risque d'atteindre 4 C². Elle conduit à une valeur carbone de 70 £₂₀₀₇/tCO_{2e} en 2030 et de 220 £₂₀₀₇/tCO_{2e} en 2050.

Depuis 2012, le BEIS publie son estimation de la valeur du carbone à court terme pour les secteurs couverts par le marché carbone européen (EU-ETS). Le calcul de la valeur du carbone est donc basé sur des estimations des prix futurs et conduit, dans sa dernière publication³, à une valeur de 4,56 £₂₀₁₇/tCO_{2e} pour 2020 et de 79,43 £/tCO_{2e} pour 2030.

Aux États-Unis, l'EPA (Environmental Protection Agency), ainsi que d'autres agences fédérales, utilisent un coût social du CO₂ pour valoriser les impacts climatiques des

¹ GIEC (2018), *Special report on Global Warming of 1.5 °C*.

² Le gouvernement du Royaume-Uni a défini en octobre 2015 de nouveaux objectifs (limitant à 1,5 °C et à 2 °C le réchauffement climatique) et a commandé au CCC de nouvelles stratégies pour les atteindre.

³ BEIS (2018), *Updated Short-Term Traded Carbon Values*, janvier.

politiques mises en œuvre¹. Un groupe de travail inter-agences² est chargé depuis 2009 d'harmoniser cette valeur et, depuis 2016, de l'actualiser en collaboration avec un comité issu de l'Académie des Sciences³. L'EPA adopte une approche coûts-bénéfices, tout en reconnaissant que les modèles utilisés (DICE – Dynamic Integrated Climate Economy – développé par William Nordhaus, PAGE – Policy Analysis for the Greenhouse Effect – développé par Chris Hope et FUND – Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution – développé par Richard Tol⁴) ne prennent pas en compte tous les impacts physiques, écologiques et économiques du changement climatique qui apparaissent dans la littérature, en raison du manque d'informations concernant la nature précise de ces dommages, et du retard de la modélisation par rapport à cette littérature. L'actualisation joue un rôle extrêmement important dans cette évaluation et les valeurs sont fournies pour différentes valeurs du taux d'actualisation (5 %, 3 % et 2,5 %). Afin d'accorder une attention particulière aux événements extrêmes à faible probabilité, la valeur (pour un taux d'actualisation de 3 %) du 95^e centile de la distribution de la valeur sociale du CO₂ est aussi mentionnée. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 5 – Coût social du carbone, 2015-2050 (en \$₂₀₀₇ par tonne de CO₂)

Année	Taux d'actualisation et statistiques			
	Moyenne 5 %	Moyenne 3 %	Moyenne 2,5 %	Impact élevé (3 % 95 ^e centile)
2015	11 \$	36 \$	56 \$	105 \$
2020	12 \$	42 \$	62 \$	123 \$
2025	14 \$	46 \$	68 \$	138 \$
2030	16 \$	50 \$	73 \$	152 \$
2035	18 \$	55 \$	78 \$	168 \$
2040	21 \$	60 \$	84 \$	183 \$
2045	23 \$	64 \$	89 \$	197 \$
2050	26 \$	69 \$	95 \$	212 \$

Source : *Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis, Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government, août 2016*

¹ EPA (2017), *Regulatory Impact Analysis for the Review of the Clean Power Plan: Proposal*, U.S. Environmental Protection Agency.

² IWG, pour Interagency Working Group.

³ National Academies of Sciences, Engineering and Medicine.

⁴ Tol R.S.J. (1996), « The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution », in Miller K. A. et Parkin R. K. (eds.), *An Institute on the Economics of the Climate Resource*, University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, p. 471-496.

Depuis 2017, le calcul est réalisé pour deux taux d'actualisation, 3 % et une nouvelle valeur, très élevée, de 7 %. Par ailleurs, seuls les dommages nationaux sont pris en compte, et non les dommages mondiaux considérés jusqu'à présent. Il en résulte alors un coût social du carbone calculé au périmètre des États-Unis bien plus faible, allant de moins de 1 \$₂₀₀₇ (pour un taux d'actualisation de 7 %) à 5,6 \$₂₀₀₇ (pour un taux d'actualisation de 3 %) pour 2020¹.

En Allemagne, une étude de l'Agence allemande pour l'environnement (UBA)² fournit, dans une approche coûts-bénéfices, une évaluation des coûts sociaux des dommages. Les valeurs recommandées sont les suivantes.

Tableau 6 – Coût social du carbone (€₂₀₁₆/tCO₂e)

	2016	2030	2050
Taux de préférence pure pour le présent de 1 %	180	205	240
Taux de préférence pure pour le présent de 0 %	640	670	730

Source : Matthey A. et Bünger B. (2018), *Methodological Convention 3.0 for the Assessment of Environmental Costs, Costs Rates*, Agence allemande de l'environnement

4.3. La mise en place d'outils de tarification du carbone

D'après le recensement tenu par la Banque mondiale, 46 pays et 25 collectivités territoriales ont mis en place une tarification du carbone³. Cette tarification couvre désormais 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, laissant 80 % des émissions échapper à tout système de tarification.

- La plupart des prix actuels du carbone sont nettement inférieurs aux fourchettes définies par la [Commission de haut niveau sur les prix du carbone, dite Commission Stern-Stiglitz](#). Ce rapport Stern-Stiglitz (2017) recommande une tarification du carbone comprise entre 40 et 80 \$/tCO₂ à l'horizon 2020 et entre 50 et 100 \$/tCO₂ à l'horizon 2030.

¹ Voir table 3-7 p. 44 de EPA (2017), soit 6 \$₂₀₁₁ pour un taux d'actualisation de 3 % et 1 \$₂₀₁₁ pour un taux d'actualisation de 7 % que nous avons converti en \$₂₀₀₇.

² Matthey A. et Bünger B. (2018), *Methodological Convention 3.0 for the Assessment of Environmental Costs, Costs Rates*, Agence allemande pour l'environnement.

³ La Banque mondiale ne traite ici que de tarification et laisse de côté les instruments réglementaires pourtant nécessaires à toute politique climatique.

- La deuxième édition de l'étude de l'OCDE¹ explique comment 42 pays de l'OCDE et du G20 représentant 80 % des émissions mondiales de carbone tarifient les émissions de carbone imputables à l'utilisation d'énergie. Le « taux effectif sur le carbone » calculé² correspond à la somme de trois éléments : les taxes visant spécifiquement les énergies fossiles, les taxes sur le carbone et les prix des permis d'émission échangeables. Si l'on retient la référence de 30 € par tonne de CO₂, le déficit de tarification de l'ensemble des 42 pays passe de 83 % en 2012 à 76,5 % en 2018.

4.4. Des valeurs de référence du carbone globalement revues à la hausse au niveau mondial

Au total, il existe désormais un grand nombre d'études disponibles sur la valorisation du carbone, dont le tableau ci-dessous donne une vue résumée et agrégée. Deux grandes tendances ressortent des évaluations récentes :

- les exercices de valorisation se fondent de plus en plus sur des approches coûts-efficacité : il faut y voir à la fois l'effet des difficultés méthodologiques inhérentes à l'approche coûts-bénéfices et la nécessité de prendre en compte des objectifs plus exigeants sur des horizons plus courts ;
- les exercices conduisent, le temps passant, à des valeurs du carbone plus élevées, celles-ci reflétant le retard accumulé et le besoin accru d'action précoce face aux risques de dommages graves et irréversibles.

Tableau 7 – Tableau récapitulatif des prix ou valeurs (en €₂₀₁₇/tCO₂e)

	Objectif	Zone géographique	2010	2015	2020	2030	205
Rapport Quinet (2008), <i>La valeur tutélaire du carbone</i>	Facteur 4	France			61 €	109 €	163-380 €
<i>Carbon Valuation in UK Policy Appraisal: A Revised Approach</i> , DECC (2009)	2 °C	Royaume-Uni			Secteurs ETS : 29 € Secteurs non ETS : 70 €	82 €	257 €

¹ OCDE (2018), *Effective Carbon Rates 2018 : Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading*, Publications de l'OCDE, Paris.

² Deux niveaux de référence sont considérés : 30 €/tCO₂, ce qui est une estimation basse des coûts du carbone aujourd'hui ; et 60 €/tCO₂, ce qui est une estimation intermédiaire de ces coûts en 2020 ou une estimation basse en 2030.

	Objectif	Zone géographique	2010	2015	2020	2030	2050
Agence fédérale allemande de l'environnement (2012)		Allemagne		640 €			
Cinquième Rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC) (2014)	430-480ppm CO _{2e} (1,5 °C plus improbable que probable, 2 °C probable) 650-720ppm CO _{2e} (2 °C improbable, 3 °C plus probable qu'improbable)	Monde				650-720ppm 11 € 430-480ppm 95 € ¹	650-720ppm 14 € 430-480ppm 190 €
Norwegian Public Roads Administration (Smith et Braathen, 2015)		Norvège		23 €		88 €	
Environmental Protection Agency, Interagency Working Group (2016)	Analyse coûts/bénéfices	États-Unis		10 € 100 €		15 € 144 €	25 € 201 €
Rapport Stern-Stiglitz de la commission de haut niveau sur les prix du carbone (2017)	2 °C	Monde			38-76 €	48-95 €	
Guivarch et Rogelj, <i>Carbon price variations in 2 °C scenarios explored</i> , document de travail (2017)	2 °C	Monde				14 €- 342 €	43 €- 949 €
Rogelj <i>et al.</i> , <i>Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1,5 °C</i> , Nature Climate Change (2018)	1,5 °C	Monde	47 € 157 €			126 € 416 €	334 € 1 102 €
Special Report on Global Warming of 1.5 °C, IPCC (2018)	Inférieur à 1,5 °C (<i>Below 1.5 °C</i>) Inférieur à 2 °C (<i>Higher 2 °C</i>)	Monde				128 € 5 217 € 10 € 190 €	232 € 12 330 € 43 € 911 €

Note : la conversion en €₂₀₁₇ de monnaies étrangères d'une année différente de 2017 a été réalisée via une conversion en monnaie étrangère 2017 puis en €₂₀₁₇. Les données utilisées ont été consultées le 8 octobre 2018.

Source : France Stratégie

¹ Le GIEC met en avant des corridors de prix plutôt qu'un niveau moyen.



CHAPITRE 2

LA DÉMARCHE COÛTS-EFFICACITÉ

En 2008, un travail d'évaluation socioéconomique spécifique a été réalisé en France pour valoriser l'action pour le climat sur un horizon de long terme. Dix ans plus tard, une mise à jour de ces travaux s'avère nécessaire : les objectifs de politique climatique ont évolué vers une plus grande ambition ; les perspectives de coopération internationale se sont précisées et les opportunités technologiques se sont élargies.

Pour réaliser cette mise à jour, le présent rapport s'appuie sur une démarche globale intégrant, au-delà des développements théoriques et empiriques disponibles, des travaux originaux de modélisation et une analyse prospective des technologies de décarbonation disponibles.

Ce chapitre présente les différentes étapes de la démarche : la formulation de l'objectif français qui fonde l'approche coûts-efficacité (section 1) ; les outils de prospective (section 2) ; le cahier des charges (section 3) et le scénario de référence (section 4).

1. L'approche est fondée sur les engagements climatiques de la France

Le terme de valeur du carbone peut concrètement renvoyer à plusieurs logiques. La première consiste à calculer le coût social des émissions de GES, c'est-à-dire le coût lié à l'émission d'une tonne équivalent CO₂. Cette logique, inspirée des travaux historiques de Pigou sur les externalités et formalisée notamment dans le rapport Stern (2006), conduit à calculer le dommage subi par l'humanité du fait de l'augmentation des concentrations de GES, indépendamment du pays à l'origine de l'émission et de la localisation des dommages.

Beaucoup d'incertitudes entourent l'évaluation monétaire des dommages nécessaire à l'analyse coûts-bénéfices, comme rappelé au chapitre 1. Sans contester la légitimité d'une approche coûts-bénéfices, sa mise en œuvre dans le cadre national se heurte à deux difficultés de principe :

- d'abord les incertitudes sur la valorisation des dommages sont trop fortes pour construire une référence ayant vocation à guider l'action politique de court-moyen terme ;
- ensuite, il est difficile, s'agissant d'une externalité globale, d'isoler un bilan coûts-bénéfices aux frontières d'un territoire particulier.

La démarche de cette commission relève donc d'une logique complémentaire. Elle ne consiste pas à évaluer le coût social des dommages produits par l'émission d'une tonne de CO₂e sur le territoire français, mais à identifier la valeur du carbone cohérente avec l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050.

Pour conduire cette démarche coût-efficacité, la commission s'est attachée à bien caractériser la portée des engagements français, pour en déduire une trajectoire pluriannuelle pertinente de valeur tutélaire.

1.1. L'objectif « zéro émissions nettes »

L'externalité climatique est une externalité de stock, liée au niveau de concentration des GES dans l'atmosphère. C'est pourquoi la prise en compte de cette externalité s'exprime en budget carbone, c'est-à-dire en plafond d'émissions cumulées dans le temps de CO₂e à ne pas dépasser pour contenir l'élévation des températures en deçà d'un certain seuil.

L'épuisement rapide des budgets carbone mondiaux et français conduit aujourd'hui à compléter les objectifs de stock – la gestion prudente d'un budget carbone pluriannuel – par un objectif en flux : un objectif de « zéro émissions nettes » de GES liées aux activités humaines, les émissions brutes résiduelles ayant vocation à être absorbées par les puits anthropiques de carbone que sont notamment les forêts, les prairies et, à plus long terme, par des dispositifs technologiques de séquestration du carbone.

- C'est ce que fait l'Accord de Paris de 2015 dont la démarche se fonde sur les travaux du GIEC. Celui-ci, dans son cinquième rapport publié en 2013 et 2014, montrait que le budget carbone mondial permettant de limiter à 2 °C ou *a fortiori* moins de 2 °C la hausse des températures serait épuisé au milieu du siècle en l'absence de toute réduction d'émissions.
- Le rapport spécial du GIEC 1,5 °C publié en octobre 2018 met en évidence la pertinence de cet ancrage « zéro émissions nettes » en conséquence logique de l'épuisement du budget carbone.
- Ce qui vaut au niveau mondial vaut aussi pour la France qui représente environ 1 % des émissions mondiales. L'objectif français d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon du milieu du siècle s'inscrit dans l'objectif mondial de limitation du réchauffement en dessous de 2 °C, voire 1,5 °C.

De fait, le cumul des émissions françaises en flux jusqu'à l'objectif « zéro émission » en 2050 conduit à la consommation d'un budget carbone cohérent avec notre part dans les émissions mondiales.

1.2. L'horizon 2050

La France se fixe un objectif de décarbonation à l'horizon 2050, sans attendre la seconde moitié du XXI^e siècle. Cet horizon est cohérent avec l'Accord de Paris qui invite les pays développés à engager des efforts rapides. Il intègre le besoin d'action précoce pour prévenir le risque de dommages graves et irréversibles.

L'objectif 2050 doit être compris comme un objectif qu'il faut soutenir dans la durée, tout au long de la seconde moitié du siècle. En d'autres termes, l'objectif final n'est pas seulement de viser un point 2050 mais de tenir dans la durée un flux d'émissions brutes compatible avec la capacité d'absorption des puits.

L'objectif français reste à cet égard prudent sur la taille des puits et *a fortiori* sur un recours potentiel en France aux solutions d'émissions négatives par stockage géologique du carbone¹ qui permettrait de lisser les efforts et de s'autoriser à court terme un dépassement du plafond d'émissions fixé.

1.3. Le découplage entre émissions et activités humaines

L'ambition française est de tracer un chemin permettant de réussir la transition vers la neutralité carbone sans peser sur l'activité économique et le niveau de vie. Chercher à atteindre un objectif d'émissions en 2050 par une compression du PIB serait coûteux en termes d'emploi et de pouvoir d'achat et inefficace sur le plan climatique – la réduction se faisant par des « fuites de carbone », c'est-à-dire des relocalisations de la production dans des pays moins ambitieux sur le plan climatique, du fait de pertes de compétitivité.

La démarche répond ainsi à deux exigences :

- décarboner en réduisant les émissions de GES par unité de production plutôt qu'en réduisant la production elle-même ;

¹ Avec par exemple l'usage énergie de la biomasse renouvelable, accompagnée d'un stockage géologique du carbone émis. Les rapports du GIEC commencent à recourir à cette solution en 2050 et au-delà dans les scénarios 2 °C, et y font largement appel dans les scénarios 1.5° (*Special Report on Global Warming of 1.5 °C*, octobre 2018).

- réduire les émissions par unité de production en investissant dans l'efficacité énergétique et les technologies décarbonées, non en délocalisant les unités de production carbonées.

Un premier découplage est déjà à l'œuvre : depuis 1990, les émissions de GES ont diminué de 16 % tandis que le PIB augmentait de 47 %. Même si une partie de ce découplage est la conséquence de la désindustrialisation française, les actions de « verdissement » de notre capital commencent à payer. L'enjeu est d'amplifier ce découplage dans les trois prochaines décennies, ce qui suppose un effort important d'investissements par constitution d'un capital productif « vert ».

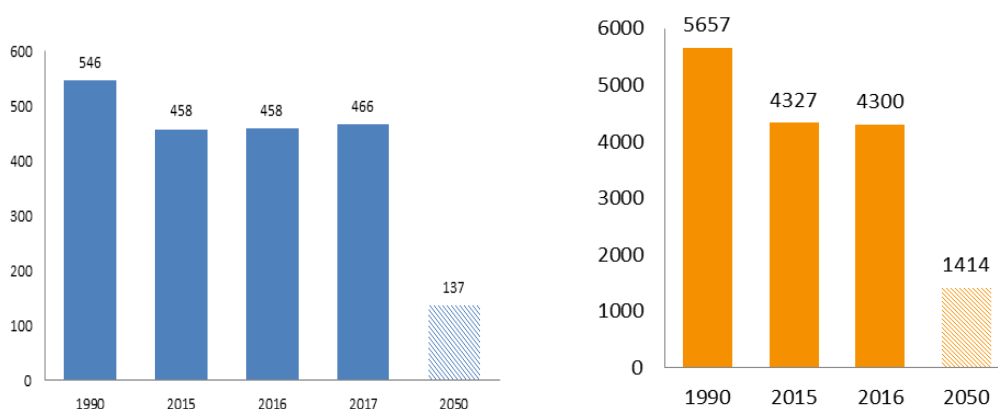
Encadré 3 – Les engagements français, du facteur 4 à la neutralité carbone

Le facteur 4

Le terme « facteur 4 » renvoie à l'engagement pris en 2003 par le chef de l'État de diviser par 4 les émissions nationales de gaz à effet de serre d'ici 2050 par rapport à 1990. Le Grenelle de l'environnement a confirmé ces objectifs en 2007.

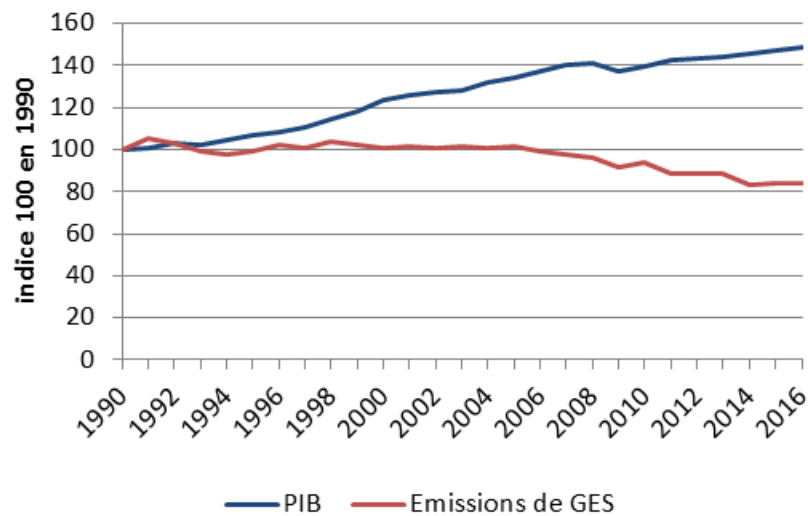
Entre 1990 et 2015, la France a réduit ses émissions de GES de 15 % et l'UE de presque un quart. Dans le même temps, le PIB de la France a crû de 47 %. Cela est bien sûr à mettre en regard du phénomène de désindustrialisation et de l'augmentation du prix des énergies fossiles, mais c'est aussi le témoignage d'un premier succès dans la lutte contre le changement climatique.

Figure 9 – Émissions de GES constatées et facteur 4 de la France (en bleu) et de l'UE (en orange) en millions de tonnes équivalent CO₂ (MtCO₂e) hors utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCF)



Sources : CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique), indicateurs 2018, et European Environment Agency (2018), *Annual European Union Greenhouse Gas Inventory 1990-2016 and Inventory Report, Submission to the UNFCCC Secretariat, 27 mai*

Figure 10 – Évolution des émissions de GES et du PIB en France
(base 100 en 1990)



Sources : Banque mondiale (PIB en dollar constant 2010) ; Emissions Greenhouse Gas Inventory – Detailed data by Party – United Nations Framework Convention on Climate Change

Pour autant notre budget carbone s'épuisant rapidement, l'objectif français a été revu en 2017, passant d'une logique « facteur 4 » à une logique de neutralité carbone à l'horizon 2050.

La neutralité carbone

Le Plan Climat de 2017, adopté dans le sillage de l'Accord de Paris, explicite l'objectif de la neutralité carbone à l'horizon 2050. À ce jour, un certain nombre de pays développés ou en développement se sont engagés pour une neutralité carbone au plus tard en 2050¹.

La neutralité carbone relève d'une approche globale. Elle prend en compte tous les GES et s'applique à l'ensemble des secteurs.

C'est une approche « nette » des puits carbone. Un secteur dont les émissions seraient inférieures à sa capacité de séquestration et de captage, comme l'est actuellement et devrait continuer à l'être le secteur forestier, pourrait à terme compenser les émissions non abattues d'autres secteurs. La neutralité carbone donne la priorité à la réduction à la source des émissions de gaz à effet de serre

¹ Il existe toutefois des différences dans la manière d'atteindre la cible de neutralité carbone. La France attend une contribution significative de ses puits carbone, notamment forestiers et agricoles, tandis que la Norvège n'exclut pas la possibilité d'avoir recours à l'achat de crédit carbone. Parmi les autres pays ayant annoncé un objectif de neutralité, on peut citer la Suède, le Portugal, les Îles Marshall et l'Espagne.

dans la mesure où le potentiel d'augmentation des puits de carbone, naturels (forêts, zones humides, usage des sols) et artificiels (CSC, CCU¹), reste limité à l'horizon 2050.

Enfin, la neutralité carbone est une approche « production » nationale, et non « consommation » ou empreinte carbone qui tient compte du contenu carbone des importations. Ces émissions importées sont au demeurant difficiles à évaluer dans un contexte d'éclatement des chaînes de valeur mondiale.

D'une ambition à l'autre

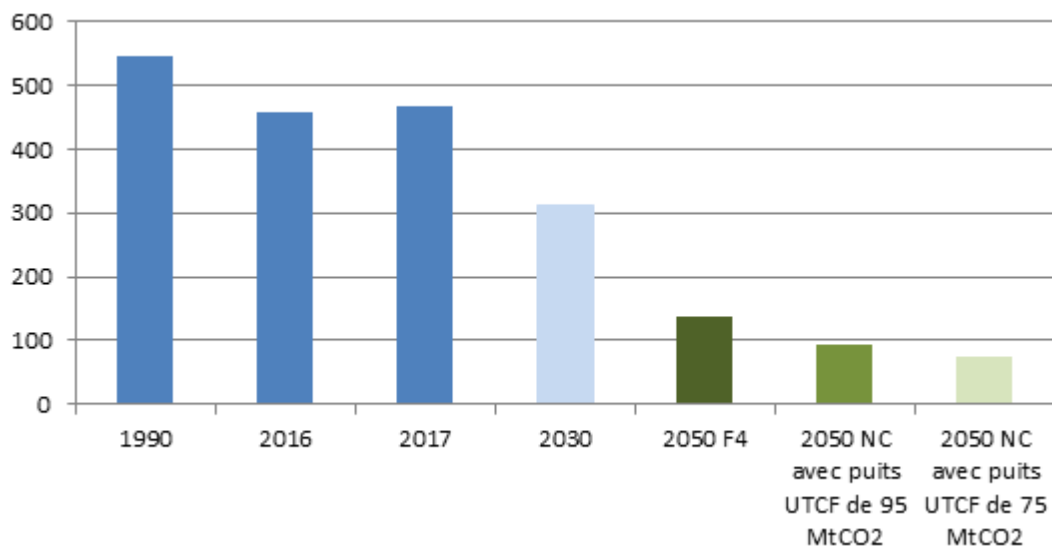
Diviser par 4 à l'horizon 2050 le niveau d'émissions de 1990, soit une baisse de 75 %, laisse 25 % d'émissions résiduelles. Ces 25 % doivent être réduites ou séquestrées pour atteindre la neutralité carbone.

Les puits liés à l'utilisation des terres, leur changement et la forêt (UTCF) sont estimés à 40 MtCO_{2e} en 2016 (contre 29 MtCO_{2e} en 1990). Il est retenu comme hypothèse que leur capacité de séquestration pourra atteindre 75 à 95 MtCO_{2e} en 2050. À ces puits naturels s'ajouteraient 20 MtCO_{2e} de capacités de séquestration liées au développement attendu de la technologie de capture et stockage du carbone. En conséquence, les puits carbone français, CSC compris, pourraient absorber de 95 MtCO_{2e} à 115 MtCO_{2e} en 2050.

Au total, le scénario neutralité carbone représente un *facteur 6 à 7* selon les potentiels réels de puits.

¹ Il s'agit d'une technologie d'atténuation du changement climatique en captant le CO₂ et en l'injectant à grande profondeur dans le sous-sol ; CCU signifie captage et utilisation du carbone. Le CCU est une technique d'atténuation du changement climatique visant à capter puis à utiliser dans différents procédés industriels le CO₂.

Figure 11 – Émissions françaises et cibles d'émissions



Lecture : le « scénario 95 » fait référence à un puits agricole et forestier de 95 MtCO₂e auquel s'ajoutent 20 MtCO₂e de CSC. Dans chacun des scénarios, l'hypothèse CSC retenue est de 20 MtCO₂e.

Source : CITEPA (2018), *Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto*, annexe 7, mars

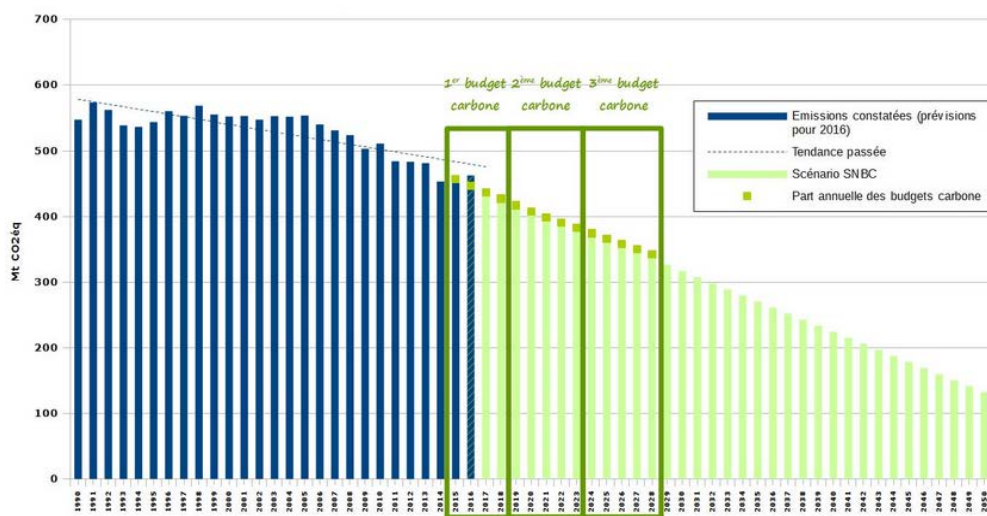
Les budgets carbone français

Les budgets carbone français¹, déterminés dans le cadre de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), sont des plafonds d'émissions de GES fixés par périodes successives de quatre à cinq ans. Il ne faut donc pas les confondre avec ceux estimés par le GIEC. Ces plafonds définissent une trajectoire précise de baisse des émissions du pays pour atteindre les cibles de moyen et long termes. Ils déterminent les limites d'émissions de GES que la France se fixe. Trois premiers budgets carbone ont été définis en 2015, qui couvrent les périodes 2015-2018, 2019-2023 et 2024-2028. Ils sont déclinés à titre indicatif par grands domaines d'activité². Le premier budget carbone, fixé à 442 MtCO₂e, est décliné de la façon indicative suivante : 127 MtCO₂e pour les transports, 76 MtCO₂e pour les bâtiments, 86 MtCO₂e pour l'agriculture, 80 MtCO₂e pour l'industrie, 55 MtCO₂e pour la production d'énergie et 18 MtCO₂e pour les déchets.

¹ Peu de pays se sont fixés des budgets carbone. Le Royaume-Uni fut le pionnier en la matière.

² Transports, bâtiments résidentiels-tertiaires, industrie, agriculture, production d'énergie et déchets.

Figure 12 – Évolution des émissions de GES en France et objectifs de la première SNBC



Source : www.ecologique-solidaire.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone

2. La démarche de la commission s'appuie sur plusieurs instruments de prospective

Force est de constater qu'il n'existe pas d'outil de simulation « clés en mains » générant mécaniquement une trajectoire pluriannuelle de valeur tutélaire du carbone. La commission propose une estimation raisonnable fondée sur le meilleur état de l'art, en intégrant dans un raisonnement global quatre ingrédients essentiels :

- **Premier ingrédient : des exercices de simulation et de prospective réalisés à l'aide de différents modèles** permettant d'objectiver la valeur tutélaire carbone en fonction du niveau d'ambition fixé, du contexte économique, des technologies disponibles et du potentiel des puits. Cette démarche consiste à évaluer, selon des paradigmes propres à chaque modèle, la trajectoire pluriannuelle de valeur carbone permettant de suivre un chemin de réduction des émissions cohérent avec l'objectif français. Formellement, les modèles macroéconomiques sectoriels modélisent une hausse du prix relatif des options carbonées et montrent comment les différents secteurs s'adaptent à cette hausse de prix relatifs, investissent et se décarbonent. Les modèles technico-économiques utilisent quant à eux une description fine des technologies pour évaluer le coût de déploiement des technologies nécessaires.

- **Deuxième ingrédient : des exercices de prospective technologique ou technico-économique**, tels ceux conduits au niveau mondial par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ou au niveau français dans le cadre de la préparation de la stratégie nationale bas carbone (SNBC), permettant d'apprécier les coûts des différentes technologies de décarbonation – et donc les prix de bascule (*switching prices*) des solutions carbonées vers des solutions décarbonées. Plus l'objectif est ambitieux plus il faut mobiliser un portefeuille de technologie large comprenant aussi des technologies pas encore matures mais qui seront nécessaires à l'atteinte de l'objectif. Ces exercices de prospective technologique sont entourés d'incertitudes croissantes à mesure que l'horizon s'allonge. Par ailleurs, cette approche ne permet pas de rendre compte de l'incidence économique de ces technologies.
- **Troisième ingrédient : une littérature économique et sociale consacrée à la question centrale de la répartition des efforts de décarbonation dans le temps.** La gestion d'un « budget carbone » conduit à recommander, dans sa version élémentaire, une valeur actualisée du carbone à la fois calée sur le coût d'abattement maximal des émissions et constante dans le temps, ce qui traduit une indifférence entre émettre aujourd'hui et émettre demain, du moment que le plafond d'émissions est respecté. Cette règle, dite règle de Hotelling, garantit en théorie que la valeur d'une ressource limitée ne diminue pas au cours du temps sous l'effet de l'actualisation (puisque'elle croît au taux d'actualisation) et que la répartition des efforts dans le temps est efficace. De fait, cette règle est, en information parfaite, celle qui permettrait d'optimiser le déploiement des technologies, le séquençage des efforts et la trajectoire de réduction des émissions.
- **Quatrième ingrédient : des échanges avec des parties prenantes** constituées de chercheurs, d'économistes, de représentants des organisations syndicales et patronales, de certaines fédérations professionnelles et de représentants des administrations concernées, afin de juger de la pertinence de la trajectoire et des conditions de mise en œuvre.

3. Le cahier des charges se fonde sur un jeu d'hypothèses raisonnables

3.1. Les caractéristiques de la neutralité carbone prises en compte par la commission

La commission a défini un cahier des charges en ligne avec l'objectif de « zéro émissions nettes » de gaz à effet de serre sur le territoire français à horizon 2050 inscrit dans le Plan pour le climat de juillet 2017 :

- les émissions considérées sont l'ensemble des émissions ayant lieu sur le territoire français nette des puits disponibles sur le territoire national. Concrètement, l'objectif inclut les émissions sur le territoire métropolitain et en outre-mer mais exclut les émissions liées à la fabrication à l'étranger des produits importés en France. Corollairement, cet objectif exclut tout transfert de l'effort climatique vers d'autres pays, par exemple en « compensant » des émissions sur le territoire national par des puits de carbone à l'étranger. Plus généralement, le rapport ne postule pas la mise en place d'un cadre intégré – marché mondial du carbone ou prix mondial du carbone – qui permettrait d'optimiser les coûts d'abattement globaux et contribuerait en retour à réduire la valeur carbone requise en France ;
- l'objectif porte sur l'ensemble des secteurs, sans intégrer *ex ante* d'objectif sectoriel puisqu'une tonne de carbone émise ou évitée est la même, quel que soit le secteur d'origine. Ce choix de méthode permet de déterminer la stratégie la moins coûteuse pour atteindre un objectif donné de réduction des émissions, en mobilisant sans a priori sectoriel les gisements d'abattement les moins coûteux ;
- l'objectif considère l'ensemble des gaz à effet de serre : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), composés fluorés (HFC, PFC, SF₆, NF₃). La définition d'une valeur tutélaire du carbone dans ce cadre implique donc de raisonner en équivalents carbone pour ces GES. Les équivalents carbone sont définis à partir du potentiel de réchauffement global (PRG) du gaz considéré relatif à celui du CO₂ (voir tableau 1).

La valeur de l'action pour le climat évaluée par la commission est une valorisation brute qui ne tient pas compte des éventuels cobénéfices associés à la baisse des émissions de GES. Par exemple, l'amélioration de la qualité de l'air suite à la baisse des émissions de particules fines permise par la réduction de la part des véhicules à combustion interne dans le transport routier n'est pas valorisée dans l'approche retenue (voir encadré 4).

Encadré 4 – Cobénéfices

Les politiques climatiques peuvent avoir des effets positifs au-delà de la limitation du réchauffement climatique, appelés cobénéfices¹. Ces derniers sont définis comme les avantages collatéraux en termes économiques, sociaux et

¹ Pour une compréhension précise des cobénéfices, se référer à Cassen C., Guivarch C. et Lecocq F. (2015), « Les cobénéfices des politiques climatiques : un concept opérant pour les négociations climat ? », *Natures Sciences Sociétés*, supplément (Supp. 3), p. 41-51. doi:10.1051/nss/2015017.

environnementaux, de santé, de progrès, de développement, etc., de la mise en œuvre de politiques d'atténuation.

Les principaux cobénéfices identifiés par la littérature sont :

- la meilleure protection des écosystèmes et de la biodiversité ;
- l'amélioration de la santé liée à la baisse des pollutions locales et à une meilleure alimentation ;
- une plus grande sécurité dans l'approvisionnement énergétique ;
- la réduction des inégalités grâce à une meilleure allocation des ressources ;
- les effets d'externalités technologiques.

Au niveau mondial, le principal cobénéfice associé à la lutte contre le changement climatique est l'amélioration de la qualité de l'air permise par la réduction de la production de charbon. Ce cobénéfice ne concerne pas la France. Au-delà de ce constat de premier rang, d'autres raisons ont conduit à ne pas prendre en compte les cobénéfices :

- *ils sont difficiles à quantifier monétairement.* Certains cobénéfices ont une traduction financière directe, d'autres ne peuvent être qu'approximés, voire ne peuvent être quantifiés et traduits par un équivalent monétaire ;
- *il n'y a pas de règle générale permettant de les intégrer dans la valeur carbone.* La façon de prendre en compte un cobénéfice dépend de sa nature. Parfois, il peut être explicitement séparé des effets des émissions de GES pour être pris en charge par d'autres politiques (réglementation sur les pots d'échappement des véhicules, par exemple). Parfois, le cobénéfice ne peut être séparé des politiques de lutte contre le réchauffement climatique ;
- il est nécessaire de considérer aussi les co-dommages. Même si les cobénéfices sont supérieurs aux co-dommages, on ne peut comptabiliser les premiers sans les seconds (les champs d'éoliennes ont un impact sur le paysage, la production de batteries électriques génère de la pollution, etc.).

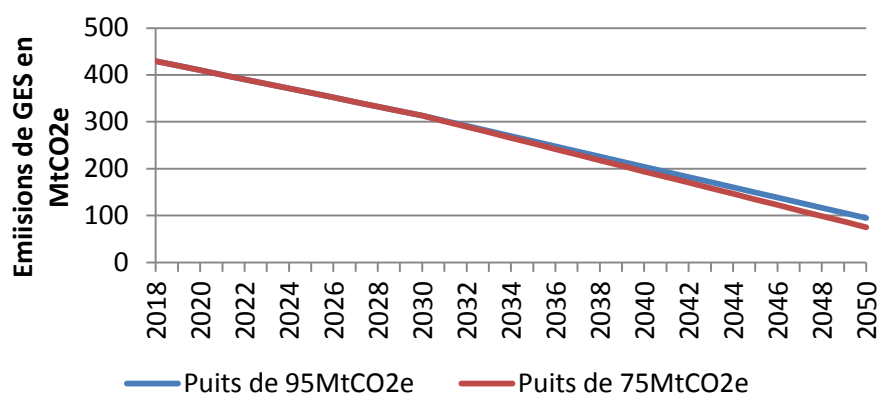
3.2. L'horizon de la simulation

Pour atteindre un objectif de flux net d'émissions nul à l'horizon 2050, la commission s'est fixé une trajectoire lissée de réduction des émissions, avec un point intermédiaire en 2030 (– 43 % d'émissions brutes par rapport aux émissions de 1990, cohérent avec l'objectif officiel français) (voir figure 13).

Ce lissage de la trajectoire des émissions de GES prend en compte :

- Une part française du budget carbone mondial permettant de limiter le réchauffement climatique sous les 2 °C, voire les 1,5 °C, cohérente avec le poids des émissions françaises de GES dans les émissions mondiales.
- Le fait que l'action de décarbonation doit être progressive de sorte à minimiser les coûts d'ajustement¹ qui peuvent être multiples :
 - les délais d'installation du capital ;
 - les effets de saturation ou de goulots d'étranglement : lorsque la demande pour un bien ou un service (les véhicules électriques, par exemple) augmente fortement, l'offre peut éprouver des difficultés à répondre à court terme ;
 - les besoins de reconversion et de formation professionnelles : lancer massivement des chantiers de rénovation du bâti implique des actions de formation et de structuration de l'offre ;
 - les coûts échoués : le changement d'échelle dans la contrainte des émissions implique de raccourcir la durée de vie de certaines installations en place. Par exemple, des centrales thermiques devront être fermées avant leur fin de vie, ce qui nécessitera de déclasser ces installations et d'investir plus rapidement pour les remplacer.

Figure 13 – Trajectoire cible de flux d'émissions



Source : France Stratégie, calculs des auteurs

¹ Les modèles technico-économiques et macroéconomiques utilisés dans le cadre de cette commission ne permettent pas d'optimiser une trajectoire de réduction des émissions de GES et nécessite de la définir *ex ante*. Le modèle théorique présenté dans les Compléments au rapport montre en revanche qu'avec la prise en compte du coût d'ajustement, la trajectoire d'émissions optimale prend la forme d'une courbe en S relativement proche d'une réduction linéaire (voir Complément 1, « Un modèle avec capital d'abattement pour l'évaluation du carbone », par Boris Le Hir, Aude Pommeret et Mathilde Salin).

L'objectif de zéro émissions nettes de gaz à effet de serre en France, présenté dans le Plan Climat, porte sur l'horizon 2050, mais il devra être tenu dans la durée. Cela emporte deux conséquences importantes :

- il faut tenir compte du bénéfice apporté par une technologie sur toute sa durée de vie afin de juger de sa pertinence. Ainsi, l'identification des technologies à déployer à l'horizon 2050 doit intégrer le bénéfice en termes de tonnes de CO₂e évitées qu'elles peuvent procurer après 2050 lorsque leur durée de vie est suffisamment longue. Si on ne tenait pas compte de la valeur résiduelle des technologies post-2050, on risquerait soit de considérer comme non rentables certaines technologies utiles pour atteindre les objectifs 2050, soit de surévaluer la valeur carbone de 2050 ;
- en second lieu, il est probable que les contraintes associées au maintien de la neutralité carbone évoluent. En particulier, les puits de carbone associés à l'utilisation des terres et leurs changements et à la forêt (puits UTCF) ou à la capture et au stockage de CO₂e n'offriront pas nécessairement les mêmes marges après 2050, ce qui peut conduire à modifier les émissions brutes cibles. Il est donc probable que le maintien de la neutralité carbone nette après 2050 implique de déployer dès en amont des changements technologiques plus ambitieux que ceux permettant de respecter la seule cible 2050.

4. Le calcul d'une trajectoire pour la valeur du carbone repose sur des travaux originaux de modélisation

4.1. Les grandes catégories de modèles utilisés

Le recours à un jeu de simulations constitue l'un des éléments clés pour déterminer une trajectoire de la valeur carbone. Trois grandes catégories de modèles peuvent être utilisées pour construire une valeur carbone :

Les modèles d'évaluation intégrée (ou modèles IAM) représentent dans un système numérique unique le cycle complet des interactions entre les activités humaines et la sphère environnementale (cercle bleu sur la figure 14). La conception de ces modèles mobilise de multiples champs disciplinaires (climatologie, géophysique, biologie, économie, ingénierie, etc.). Les principales relations décrites sont celles qui lient les activités économiques, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) dans les systèmes climatiques et les impacts du changement climatique sur les systèmes socioéconomiques. Ces modèles permettent de définir le type mais aussi la proportion d'actions souhaitables pour atténuer le réchauffement climatique et s'inscrivent donc

dans une logique coûts-bénéfices telle que décrite dans le premier chapitre de ce rapport. Le modèle DICE de Nordhaus¹ est un modèle emblématique des modèles IAM.

L'approche coût-efficacité adoptée ici ne nécessite pas de modéliser la sphère environnementale puisque l'objectif de réduction des émissions est considéré comme fixé. Seules les composantes technologiques et macroéconomiques du système, ainsi que les flux d'émissions de GES, doivent être modélisés (partie entourée par le cercle en pointillés verts sur la figure 14).

Les modèles technico-économiques décrivent de façon détaillée les technologies de production d'un ou plusieurs secteurs. Ce sont des modèles dit « d'ingénieur ». La plupart d'entre eux se concentrent sur un domaine en particulier. Par exemple, les modèles TIMES et POLES utilisés par la commission visent à représenter de la façon la plus complète possible le système énergétique. Ce système inclut à la fois les technologies de production et les technologies liées à l'utilisation de l'énergie, et permet de gérer avec cohérence leurs substitutions potentielles. Ils peuvent ainsi fournir des informations à un niveau fin sur l'offre d'énergie, le mix énergétique et les technologies utilisées, les émissions émises, etc. L'objet principal de tels modèles est de définir la structure du système énergétique en fonction d'un contexte macroéconomique donné, de la disponibilité des ressources, des politiques publiques et d'informations détaillées sur les technologies disponibles. Ces modèles ne sont pas « bouclés » économiquement, et ne peuvent donc pas prendre en compte les effets de rétroactions macroéconomiques ou intersectorielles.

Les modèles macroéconomiques fournissent, à l'inverse, des informations quant aux effets d'une politique environnementale sur l'économie, tout en décrivant de manière plus sommaire les technologies. Ces modèles permettent d'endogénéiser les effets de rétroaction macroéconomiques, ainsi que des mécanismes de substitution entre facteurs de production et biens de consommation. Ils permettent ainsi de mettre en évidence l'impact qu'un tel objectif peut avoir sur la compétitivité, la production et l'emploi. Parmi les modèles mobilisés par la commission, IMACLIM, ThreeME et NEMESIS font partie de cette catégorie de modèles. Les deux premiers intégrant certaines dimensions technico-économiques.

L'encadré 5 page suivante présente très brièvement les modèles mobilisés par la commission de façon individuelle, ceux-ci étant décrits plus en détail dans les Compléments au rapport.

¹ Nordhaus W. (2017), « DICE/RICE models - William Nordhaus - Yale Economics ».

POLES-Enerdata¹ est un modèle de simulation du système énergétique. C'est un modèle dynamique récursif qui calcule ses variables année après année avec des anticipations adaptatives. Il couvre un champ géographique large puisque c'est un modèle mondial régionalisé. Le monde y est divisé en 54 zones modélisées individuellement – dont les 28 pays de l'UE ainsi que quatre pays limitrophes (Norvège, Islande, Suisse, Turquie) – et 12 régions représentant le reste des pays non modélisés individuellement. POLES a également la particularité de calculer de manière endogène la demande d'énergie, l'offre, les prix des énergies sur les différents marchés régionaux, ainsi que les émissions sectorielles de six gaz à effet de serre.

Les modèles macroéconomiques

IMACLIM-R France² est un modèle d'équilibre général calculable à dynamique récursive qui représente l'économie française en quinze secteurs économiques. Il a la particularité d'inclure également des modules technico-économiques endogènes pour représenter l'évolution du mix électrique, des stocks de bâtiments résidentiels et des flottes de véhicules (et donc reflète une partie des caractéristiques des modèles technico-économiques sur le détail technologique et le progrès technique induit). Les anticipations sont globalement adaptatives sauf sur la trajectoire de la valeur carbone pour laquelle les anticipations peuvent être supposées soit adaptatives/myopes (les agents extrapolent la valeur future à la valeur courante) soit parfaites.

ThreeME est un modèle macroéconomique d'équilibre général calculable multisectoriel (MEGC) d'inspiration néo-keynésienne, conçu pour évaluer les impacts macroéconomiques des politiques publiques, notamment énergétiques et environnementales. Il décrit l'économie française en 37 secteurs, dont 17 secteurs énergétiques, et intègre aussi des aspects technico-économiques. Le modèle est à dynamique récursive et anticipations adaptatives. La consommation d'énergie dépend notamment de l'évolution du stock de logements, de véhicules, des biens d'équipement et de leurs caractéristiques.

NEMESIS est un système de modèles économétriques sectoriels élaborés pour chacun des 28 pays de l'Union européenne. Il est destiné à la prospective quantitative et à l'analyse des politiques économiques, notamment des politiques dites « structurelles » dont les effets atteignent les

¹ Il existe trois versions du modèle POLES : POLES-Enerdata, POLES-JRC (Commission européenne) et POLES-GAEL (université de Grenoble). Le modèle utilisé par cette commission est le modèle POLES-Enerdata qui, par souci de simplicité, sera référencé POLES dans la suite du document.

² Il existe une version monde qui décrit l'économie mondiale en douze régions et d'autres versions pays (Brésil notamment).

moyen et long termes (recherche, environnement, énergie, fiscalité, budget, etc.). L'économie y est désagrégée en trente secteurs de production. C'est là encore un modèle dynamique récursif (résolution par pas annuels) et à anticipations adaptatives.

4.2. Des modèles qui doivent être complétés pour couvrir tous les GES

Les modèles qui viennent d'être décrits ne prennent en compte, pour la plupart, que les émissions de CO₂ d'origine énergétique. Celles-ci ne représentent que 70 % des émissions totales de GES. Or l'objectif de neutralité carbone concerne la totalité de ces GES. Trois « angles morts » des modèles doivent donc être couverts : les émissions agricoles non énergétiques, les émissions issues des procédés industriels et celles liées au traitement des déchets. Les possibilités de modélisation étant limitées pour les deux derniers types d'émissions¹, des hypothèses sur les réductions possibles ont été réalisées hors modèles. Concernant les émissions agricoles non énergétiques, les possibilités de réduction ont été établies sur la base d'un modèle technico-économique développé par l'INRA. Le chiffrage des réductions d'émissions dans les différents secteurs est présenté au chapitre suivant.

4.3. Les principes généraux des exercices de simulation et de prospective

Ce qui entre et ce qui sort des modèles

Un modèle, quelle que soit sa nature, intègre un jeu d'équations permettant de calculer des variables dites endogènes à partir de variables dites exogènes qui, par définition, ne sont pas calculées mais imposées au modèle. Il n'est évidemment possible d'interpréter les résultats d'un modèle qu'à condition de comprendre ce qui « entre » dans le modèle (les variables exogènes) et ce qui en « sort » (les variables endogènes). La nature de ces variables entrantes et sortantes est largement liée à la catégorie de modèles.

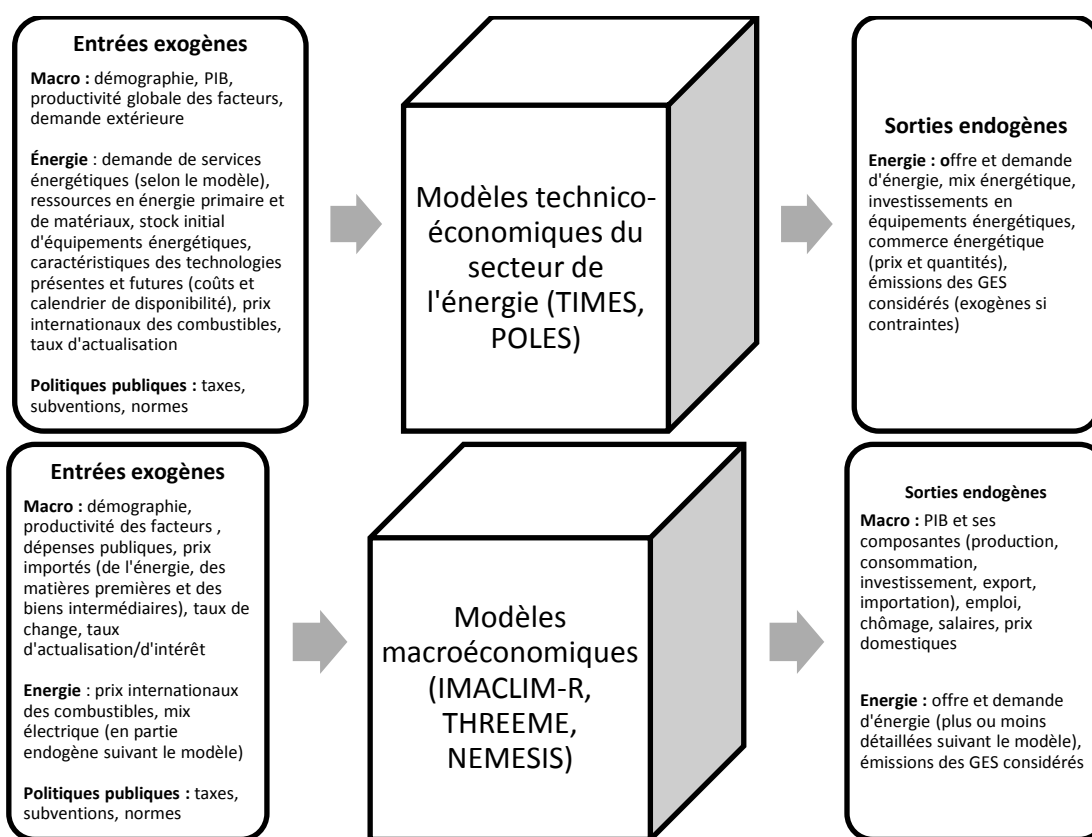
Dans les modèles technico-économiques du secteur de l'énergie la plupart des variables macroéconomiques sont exogènes et sont imposées en entrée du modèle, sans effet de rétroaction. Ces modèles ne permettent donc pas d'analyser les variations macroéconomiques. En revanche, ils fournissent une description fine du mix énergétique, des

¹ Seul le modèle ThreeME apporte des informations sur les émissions de procédés industriels. Il intègre les émissions liées à la cuisson des produits minéraux non métalliques qui représente l'essentiel des émissions liées aux procédés industriels.

investissements en équipements énergétiques, de la production et de l'usage de l'énergie (la demande de service énergétique reste toutefois exogène dans certains modèles), du commerce énergétique (prix et quantités) ou des émissions des GES (sauf dans le cas où celles-ci sont contraintes).

Dans les modèles macroéconomiques, un grand nombre de variables macroéconomiques sont endogènes. En revanche, les mix technologiques sont potentiellement exogènes et, surtout, la caractérisation de ces technologies est beaucoup moins fine.

Figure 15 – Schéma indicatif des entrées-sorties des modèles

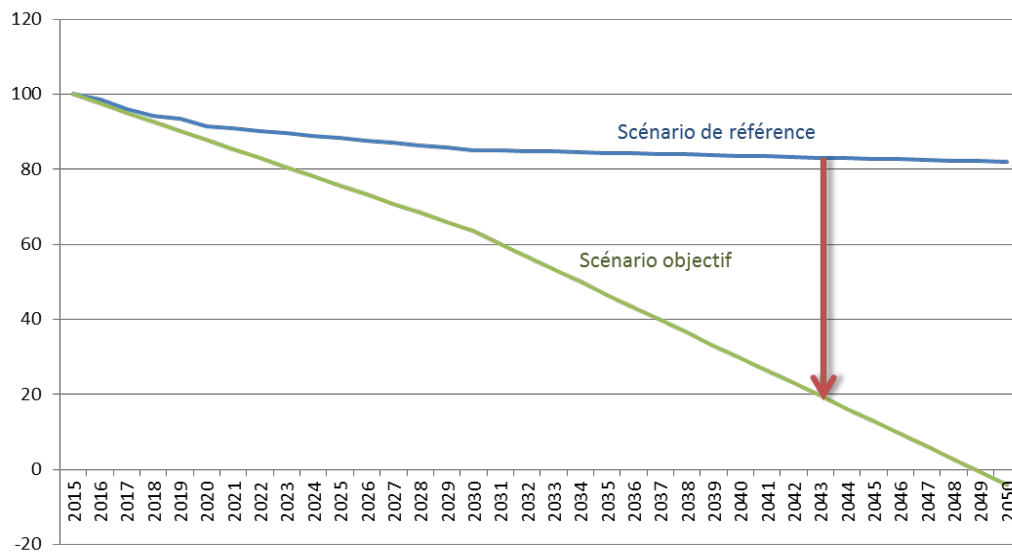


Note : la liste des exogènes et des endogènes variant de façon importante d'un modèle à l'autre y compris au sein d'une même catégorie, ce schéma n'est donné qu'à titre indicatif.

L'analyse en écart variantiel

Ces modèles ont été utilisés ici pour déterminer une valeur du carbone associée au passage d'un scénario de référence présentant une trajectoire spontanée d'émissions en l'absence de nouvelle politique climatique au scénario « objectif » aboutissant à la neutralité carbone en 2050 (voir figure 16).

Figure 16 – L'analyse en écart variantiel



Source : France Stratégie, calculs des auteurs

Ce que reflète la valeur carbone dans les modèles

La valeur carbone est définie de la manière suivante selon la catégorie de modèles (voir aussi l'encadré 6) :

- la valeur carbone définie par les **modèles technico-économiques** est un coût marginal d'abattement. Elle est déterminée par le **coût révélé ex post** du respect des contraintes d'émissions de GES sur la trajectoire, en d'autres termes le coût du système technologique à déployer pour abattre la quantité d'émissions imposée par la contrainte ;
- la valeur carbone définie par les **modèles macroéconomiques** représente le **prix relatif des produits carbonés** qui rend compétitives les technologies décarbonées.

Encadré 6 – La valeur carbone selon les différentes spécifications des modèles

Les modèles technico-économiques utilisent une description fine des technologies – leur coût, leur vitesse de développement et d'arrivée à maturité, les contraintes associées – pour évaluer le coût de déploiement optimal des technologies nécessaires au respect de la trajectoire de réduction des émissions imposée. Les modèles macroéconomiques sectoriels modélisent quant à eux un prix implicite sous la forme d'une hausse du prix relatif des produits carbonés et montrent comment les différents secteurs s'adaptent à cette hausse de prix

relatifs, investissent dans des technologies abattant des émissions et se décarbonent. La première catégorie de modèles définit donc la valeur carbone comme le coût marginal optimal de l'effort permettant d'abattre une tonne d'émission supplémentaire, tandis que les modèles macroéconomiques la définissent comme le signal-prix permettant de décentraliser le respect de la contrainte.

La prise en compte des anticipations est un autre élément important de différenciation des modèles.

Le modèle TIMES, qui appartient à la catégorie des modèles technico-économiques, est un modèle d'optimisation inter-temporelle piloté par la demande : il fonctionne en anticipations parfaites. Le modèle optimise le système énergétique sur l'ensemble de la période en minimisant le coût total actualisé du système énergétique. Par rapport à un modèle à anticipations adaptatives, il peut donc être amené à déployer des technologies plus coûteuses à court terme qui permettront de réduire les coûts futurs en évitant par exemple des effets de verrouillage technologique ou « *lock in* ». Les technologies ne sont alors pas nécessairement déployées individuellement dans un ordre de mérite. Pour cette raison, la valeur carbone calculée par ce type de modèles technico-économiques à anticipations parfaites tend à être supérieure à celles des modèles à anticipations adaptatives à court terme mais plus modérée à long terme, l'ensemble de la trajectoire de cette valeur étant davantage optimisée.

Le modèle IMACLIM, qui appartient à la catégorie des modèles macro-économiques sectoriels dynamiques récursifs, repose sur des anticipations adaptatives mais peut faire l'hypothèse d'anticipations adaptatives/myopes ou parfaites de la valeur carbone future. Dans le premier cas, les agents extrapolent simplement la valeur courante (qui évolue dans le temps). Dans le deuxième cas, tout se passe comme si la trajectoire de valeur du carbone était connue à l'avance par tous les agents économiques, les autres indicateurs économiques restant imparfaitement anticipés. C'est la perspective d'une valeur du carbone future élevée qui conduit les agents à agir aujourd'hui. Par exemple, pour un individu devant remplacer un véhicule dont la durée de vie est de plusieurs années, s'il est prévu que la valeur carbone augmente rapidement dans les années qui suivent, il peut être pertinent d'opter dès à présent pour un véhicule électrique plutôt que pour un véhicule à essence moins cher, même si la valeur carbone présente est encore faible (le coût complet actualisé de la première option sur la durée d'utilisation sera plus faible et l'investissement rentable à terme). Le modèle IMACLIM a été utilisé sous ces deux hypothèses (anticipations parfaite et adaptative sur la valeur du carbone) de sorte à illustrer l'impact de celles-ci sur la trajectoire de la valeur tutélaire du carbone.

4.4. La modélisation du progrès technique

Il n'existe que deux possibilités pour réduire les émissions de GES d'une économie : soit on réduit la production, soit on réduit la quantité d'émissions de GES par unité de production. Un objectif de neutralité visant à réduire les émissions sans compromettre le bien-être, la croissance et la compétitivité française conduit à privilégier la seconde possibilité.

Pour découpler les émissions de GES et le PIB d'un pays¹, là encore deux options sont possibles :

- **la diminution, sur le territoire, du poids des activités les plus émettrices** en faveur des activités les plus propres. L'inconvénient majeur d'une telle politique est qu'elle conduit à des « fuites carbone », c'est-à-dire à des délocalisations. Une telle politique aurait potentiellement un effet net nul, voire négatif, sur les émissions de GES à l'échelle planétaire, puisque la réduction des émissions françaises pourrait être compensée par l'augmentation de celles des pays exportateurs de produits carbonés ;
- **la constitution d'un stock de capital décarboné²** permettant de découpler le PIB et les émissions de GES. C'est pourquoi la modélisation du progrès technique est un élément essentiel pour appréhender, de la façon la plus pertinente possible, les possibilités de décarbonation de l'économie.

Les modèles technico-économiques et hybrides sont ceux qui modélisent le plus finement les changements technologiques à l'échelle des différents secteurs. Ce sont précisément des modèles de choix technologiques sous contraintes : ils incorporent une matrice des technologies disponibles présentes et futures, la date de disponibilité de ces technologies, l'évolution de leur coût au cours du temps et leur gisement potentiel (voir figure 17). Ils prennent par ailleurs en compte un certain nombre de contraintes associées à ces technologies (par exemple, l'adoption massive des véhicules électriques entraîne de nouvelles contraintes dans le secteur des transports, notamment sur l'installation de bornes et d'infrastructures, etc.). Cette « topologie » des différentes technologies est établie sur la base d'un travail d'expertise méticuleux pour chaque filière et chaque usage.

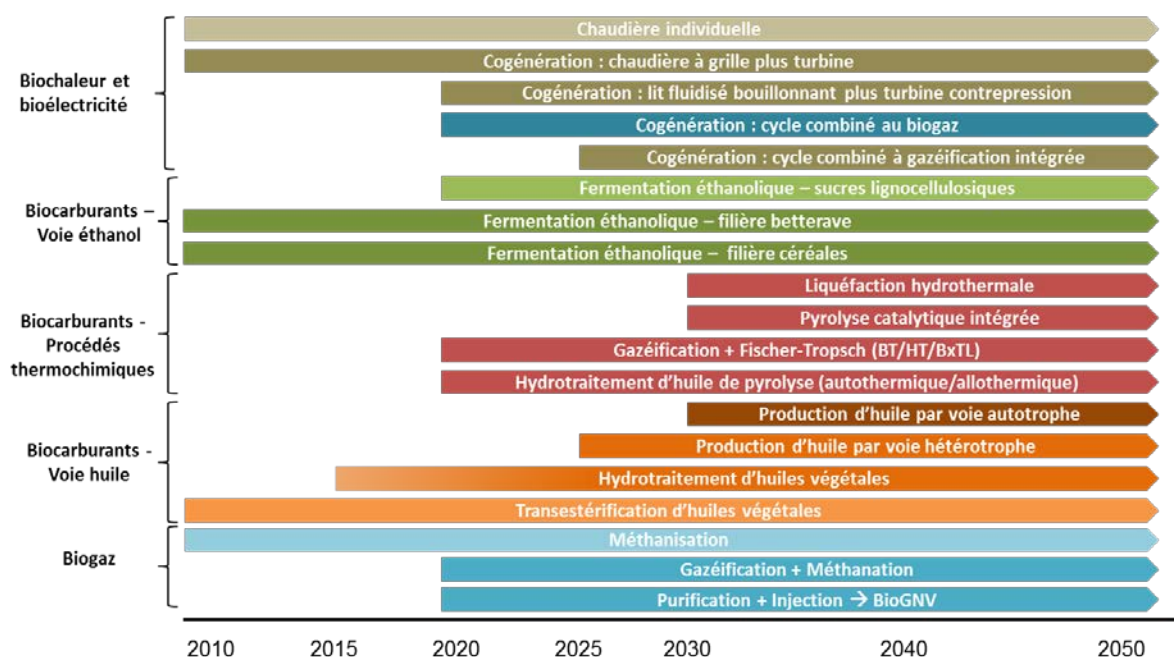
¹ Dans une approche production et non empreinte carbone.

² Le terme « vert » est, par abus de langage mais dans un souci de simplification, associé uniquement à la décarbonation de l'économie et non à d'autres aspects environnementaux.

Dans ces modèles technico-économiques ou dans les modèles hybrides, une partie du progrès technique peut-être « endogénéisée » par des **effets d'apprentissage** (progrès technique induit) de deux types :

- selon le « *learning by researching* », investir dans la R & D entraîne une baisse des coûts de la technologie. Les données disponibles ne permettent cependant pas d'intégrer ce vecteur de progrès technique dans les modèles technico-économiques¹ ;
- selon le « *learning by doing* », plus une technologie est déployée à grande échelle (c'est-à-dire, plus la puissance installée cumulée est importante), plus le coût de cette technologie diminue. Cette forme de progrès technique est plus facilement intégrée dans les modèles à l'aide notamment de « courbes d'apprentissage » qui décrivent la baisse du coût de chaque technologie en fonction de son niveau de déploiement. Le modèle POLES intègre de telles courbes d'apprentissage (voir figure 18) et endogénéise ainsi en partie le progrès technique.

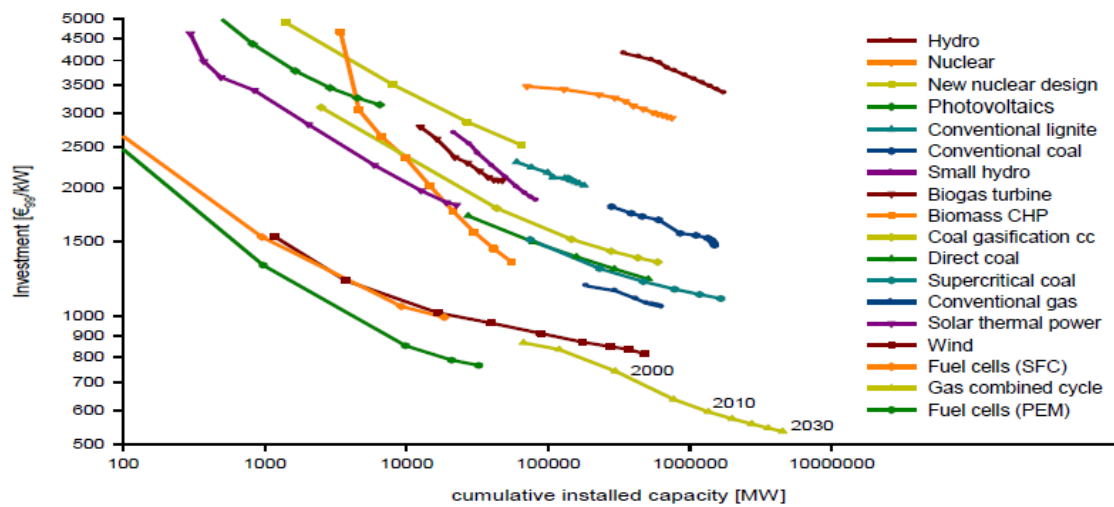
Figure 17 – Exemple de prospective technologique fournie en entrée des modèles technico-économiques



Source : CMA, modèle TIMES

¹ Cela nécessiterait en particulier des données de R & D par technologie, données qui n'existent pas ou sont très rares (il existe plutôt des données par activité économique).

Figure 18 – Exemple de courbes d'apprentissage « *learning by doing* »



Source : Enerdata, modèle POLES

Les hypothèses sur les anticipations des agents ont une influence importante sur la dynamique d'adoption des technologies. Suivant les modèles, les choix technologiques peuvent être effectués par des agents à anticipation dites « adaptatives » (modèles POLES), qui ne possèdent que l'information présente qu'ils tendent à prolonger et n'anticipent qu'imparfaitement les évolutions technologiques et leurs coûts futurs. Ils peuvent, au contraire, être effectués par des agents à anticipations dites « parfaites » (modèle TIMES), qui disposent de toute l'information présente et future et la traitent de manière optimale. Des anticipations parfaites conduisent à investir dans des technologies plus chères au départ mais qui permettent d'atteindre l'objectif final à moindre coût. La commission a utilisé des modèles qui prennent en compte ces deux types d'hypothèses sur les anticipations : POLES considère des agents à anticipations adaptatives tandis que TIMES postule qu'ils ont des anticipations parfaites¹.

5. Le scénario de référence

Le scénario de référence est celui qui décrit :

- la manière dont évolueraient spontanément l'économie, les systèmes technologiques et les émissions françaises en l'absence de nouvelle politique climatique ;
- le contexte dans lequel le scénario objectif devra être atteint.

¹ Des tests de sensibilité à l'horizon des anticipations ont été effectués avec TIMES.

C'est à partir de cette référence que sont évalués les changements nécessaires pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

Cette section décrit les éléments déterminants du scénario de référence, à savoir les politiques climatiques prises en compte, la croissance économique, l'efficacité énergétique, le mix énergétique, ainsi que le contexte international.

5.1. Un environnement international « neutre »

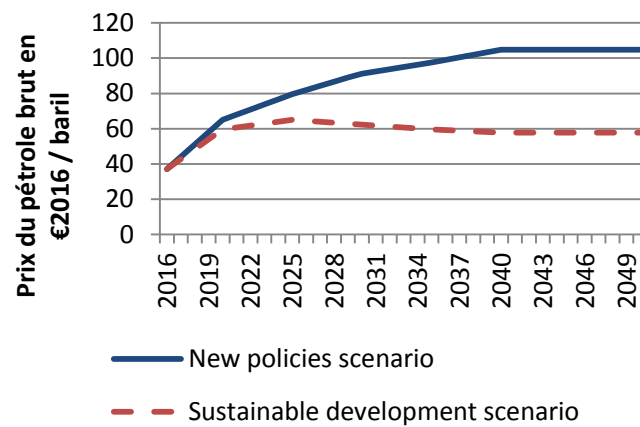
L'analyse réalisée ici est une analyse à scénario mondial inchangé. Autrement dit, on ne compare pas une situation où la France et le reste du monde se décarbonent à une situation de référence où ni l'un ni l'autre ne réduisent leurs émissions ; mais une situation où la France se décarbonne à une situation où elle ne fait pas d'efforts spécifiques de décarbonation, à contexte international donné. Le chemin à parcourir pour passer du scénario de référence au scénario de décarbonation n'en reste pas moins dépendant des hypothèses sur ce contexte international.

Dans ce cadre, il a été choisi dans cet exercice, premièrement, de prendre un point de vue agnostique sur le contexte international dans le scénario de référence, en écartant les scénarios extrêmes ; et, deuxièmement, de tester la sensibilité des résultats aux différents canaux d'influence du contexte international, afin d'évaluer l'ordre de grandeur de l'incertitude sous-jacente.

- Les projections retenues de prix des énergies fossiles sont issues du scénario central de l'AIE appelé « *New policies scenario* »¹. Ce scénario repose sur l'hypothèse que les pays respectent les engagements définis par les contributions déterminées au niveau national (NDC) pris en amont de la COP21. Ces engagements correspondent à une mobilisation qui reste insuffisante pour limiter le réchauffement sous le seuil des 2 °C. Une hypothèse alternative a été testée pour évaluer la sensibilité des résultats à celle-ci : celle du scénario de l'AIE appelée « *sustainable development* » où la mobilisation mondiale est supposée permettre la limitation du réchauffement climatique à 2 °C. Dans ce scénario, la demande pour les énergies fossiles étant plus faible, leur prix est réévalué à la baisse (voir figure 19). Concernant les prix des autres ressources, il n'a pas été fait d'hypothèses particulières et l'impact d'une augmentation éventuelle du prix des ressources nécessaires aux technologies de décarbonation peut se ramener à celui d'une augmentation du coût de ces technologies.

¹ Agence internationale de l'énergie (2017), *World Energy Outlook*.

Figure 19 – Prix du pétrole brut, scénarios AIE



Source : World Energy Outlook 2017 de l'AIE jusqu'en 2040 ; retraitement : interpolation linéaire entre les prix 2016, 2025 et 2040, prix figés après 2040

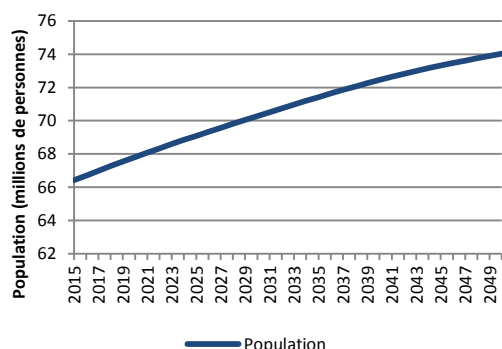
- Il n'est pas supposé dans ces exercices de simulation qu'une technologie de substitution aux technologies carbonées à coût modéré et au potentiel illimité (technologie dite « *backstop* ») puisse être déployée pour abattre les émissions. L'impact de ce choix prudent se justifie aisément à court ou moyen terme.

L'évaluation de l'incertitude sous-jacente à ces éléments est décrite dans le chapitre suivant du rapport.

5.2. Une hypothèse de croissance de 1,6 % par an en moyenne

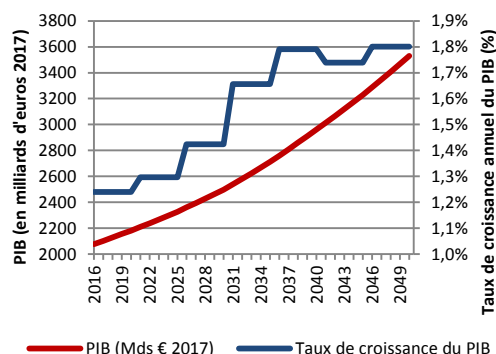
Les hypothèses démographiques et macroéconomiques (homogénéisées entre les modèles) relèvent de projections définies par des institutions publiques de références nationales ou internationales. Les évolutions démographiques françaises sont fondées sur les projections de l'Insee (voir figure 20) ; les hypothèses de croissance sur les projections de l'Ageing Report 2015 de la Commission européenne, soit une croissance annuelle moyenne de 1,6 % sur l'ensemble de la période (voir figure 21). Pour les modèles macroéconomiques, cette trajectoire est endogène mais compatible avec cet ordre de grandeur.

Figure 20 – Projection démographique dans le scénario de référence



Source : Insee ; le scénario central de projections de population 2013-2070 pour la France

Figure 21 – Projection du PIB dans le scénario de référence



Source : European commission, Ageing working group, Ageing Report 2015

5.3. Un scénario de référence sans signaux-prix sur le carbone

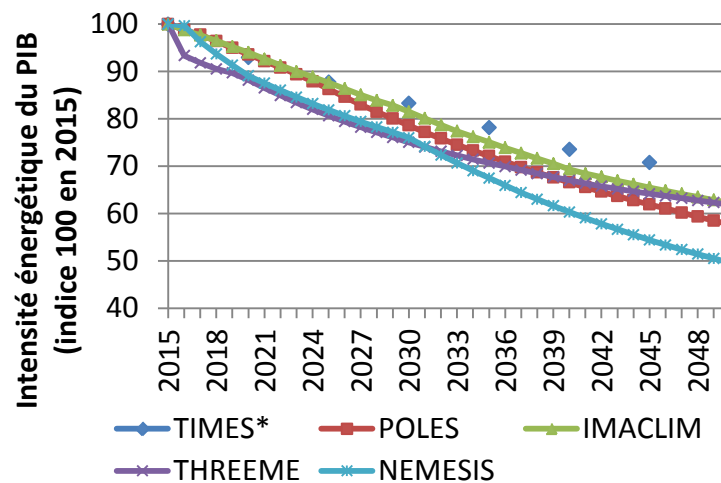
Le scénario de référence n'intègre pas de nouvelles politiques publiques pour lutter contre les émissions de GES au-delà de celles en vigueur en 2017. Il a été choisi de désactiver dans le scénario de référence celles correspondant à un signal-prix explicite (ce qui s'est traduit en particulier par une mise à zéro de la tarification du carbone et du prix du marché ETS) mais de maintenir les autres politiques publiques, en particulier des normes de construction des bâtiments, qui ne reflètent pas uniquement des objectifs climatiques. Tous les modèles ne décrivant pas l'ensemble des politiques publiques de façon explicite, ce choix a été mis en œuvre en fonction de leur capacité à identifier ces politiques.

5.4. Une tendance favorable de gains d'efficacité énergétique

Une partie importante de la décarbonation de l'économie se fera au moyen d'une baisse de l'intensité énergétique de la production, mais là encore, l'augmentation future de l'efficacité énergétique ne peut être intégralement attribuée à la transition bas carbone. Seule l'amélioration tendancielle de l'efficacité énergétique est conservée dans le scénario de référence.

La figure 22 décrit l'évolution spontanée de l'intensité énergétique du PIB obtenue par les différents modèles pour le scénario de référence. Elle montre que les gains anticipés d'efficacité énergétique de la production nationale sont importants, même avant actions climatiques spécifiques, de 30 % à 50 % entre 2015 et 2050 en fonction du modèle.

Figure 22 – Évolution de l'intensité énergétique du PIB dans le scénario de référence



Note : l'intensité énergétique du PIB est calculée ici par le ratio consommation totale d'énergie finale sur PIB, indicé à 100 en 2015.

* Le modèle TIMES ne permet pas d'endogénéiser la demande de service énergétique. La demande sectorielle de service énergétique a été calée sur les simulations de ThreeME avec ajustements éventuels pour refléter des spécificités sectorielles.

Source : calcul des auteurs à partir des résultats de simulation des modèles

5.5. Des émissions de GES calculées par les modèles

Sur la base de leurs paramétrages respectifs et des hypothèses décrites ci-dessus, les modèles définissent l'évolution tendancielle des émissions de GES d'origine énergétique. La figure 23 décrit cette évolution spontanée des émissions de CO₂ obtenue par les différents modèles dans le scénario de référence. Cette figure montre des trajectoires significativement différentes et par conséquent des montants d'émissions à abattre d'ampleur variable entre les modèles.

La figure 24 relie l'évolution spontanée des émissions à celle du PIB. Cette figure montre une tendance significative au découplage des émissions au PIB dans le scénario de référence pour la plupart des modèles, ce découplage étant associé à la baisse tendancielle de l'intensité énergétique.

Figure 23 – Émissions de CO₂ d'origine énergétique dans le scénario de référence

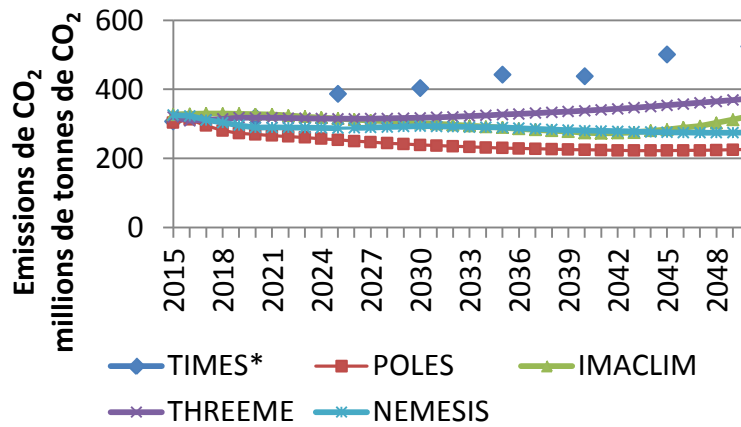
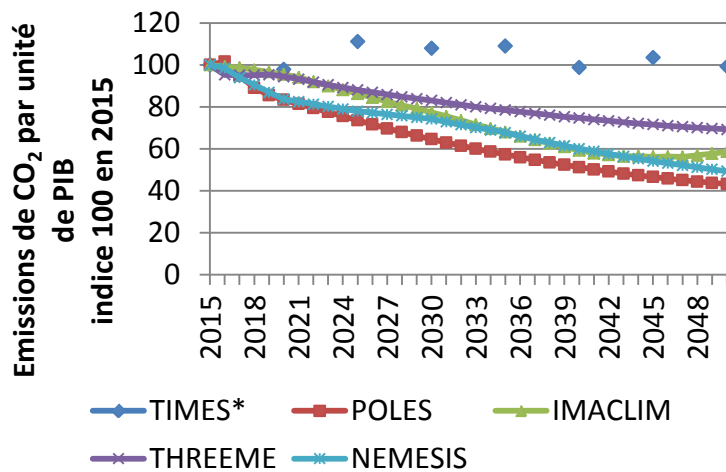


Figure 24 – Émissions de CO₂ d'origine énergétique par unité de PIB dans le scénario de référence



Note : les émissions considérées ici sont uniquement les émissions de CO₂ d'origine énergétique.

* Le modèle TIMES ne permet pas d'endogénéiser la demande de service énergétique, la demande sectorielle de service énergétique a été calée sur les simulations de ThreeME avec ajustements éventuels pour refléter des spécificités sectorielles. Le modèle TIMES est aussi le modèle pour lequel la suppression des politiques carbone a pu être la plus exhaustive, tendant ainsi à remonter l'intensité carbone de l'économie dans le scénario de référence par rapport aux autres modèles.

Source : calcul des auteurs à partir des résultats de simulation des modèles



CHAPITRE 3

LES RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS EXERCICES DE PROSPECTIVE

Ce chapitre présente les résultats « bruts » des différentes démarches mises en œuvre par la commission. Ces résultats bruts constituent les « ingrédients » utiles à la construction de la trajectoire de valeur tutélaire du carbone proposée au chapitre suivant. Les travaux de prospective mobilisés et conduits de manière spécifique sont décrits en première partie, ainsi que la sensibilité des résultats obtenus aux grandes hypothèses structurantes : le contexte international, la taille des puits, les comportements et le progrès technique.

La seconde partie décrit les grands enjeux économiques de la transition vers la neutralité carbone tels qu'ils ressortent des exercices de prospective. La commission ne présente pas les impacts macroéconomiques et sociaux de la transition bas carbone, dans la mesure où ces impacts dépendent étroitement de la conception précise des mesures de politique environnementale. Mais nos travaux permettent d'éclairer les conditions d'une transition réussie et la nature des réallocations sectorielles sous-jacentes.

1. Toutes les approches convergent vers une revalorisation substantielle de la valeur de l'action pour le climat

1.1. Les modèles

Les valeurs carbone obtenues par les modèles

Le recours aux modèles de simulation permet d'intégrer une trajectoire de réduction des émissions de GES dans notre environnement technologique et économique, afin de mieux comprendre comment les comportements et les technologies se transforment pour permettre la réalisation de cette trajectoire vers l'objectif ZEN. Ces modèles sont largement utilisés dans les évaluations internationales de valeur carbone. Le GIEC, en

particulier, fonde en grande partie ses estimations de prix mondiaux du carbone sur des panels de simulations réalisées avec une large gamme de modèles, selon des méthodologies très proches de celle adoptée par la commission¹.

Le tableau 8 ci-dessous rassemble les valeurs carbone obtenues par les différents modèles utilisés par la commission : les deux modèles technico-économiques TIMES et POLES et les trois modèles macroéconomiques sectoriels IMACLIM, ThreeME et NEMESIS.

La commission a tenu à recourir à une large variété de modèles, afin de définir une plage de valeurs tutélaires du carbone raisonnable, qui ne serait pas dépendante d'une spécification particulière. Les modèles utilisés se différencient principalement sur la base de deux critères : la catégorie de modèles (technico-économiques ou macroéconomiques) et la prise en compte d'anticipations parfaites ou adaptatives (de la valeur future du carbone et/ou de l'ensemble des signaux économiques).

Tableau 8 – Valeurs du carbone définies par les modèles

		Valeur tutélaire du carbone pour des puits compris entre 75 MtCO ₂ e (en orange) et 95 MtCO ₂ e (en bleu) (€ ₂₀₁₆ /tCO ₂ e)									
		2030		2035		2040		2045		2050	
Technico-économiques	TIMES	322	288	293	285	375	465	661	1 054	1 365	2 451
	POLES	253	351	384	547	575	845	907	1 400	1958	3 513
Macro-économiques sectoriels	IMACLIM*	168	168	168	168	168	168	440	489	1 453	3 132
	IMACLIM (myope)**	228	--	288	--	537	--	1 337	--	3 328	--
	ThreeME	143	143	226	402	363	1 128	428	1 626	511	2 389
	NEMESIS	185	185	360	393	655	784	1 358	1934	--	--
	Moyenne	221		319		551		1 058		2 233	
	Minimum-maximum	143	351	168	547	168	1 128	428	1 934	511	3 513

* Modèle ayant tourné sans hypothèse d'anticipation parfaite sur la VTC pour des valeurs pour des puits de 95 MtCO₂e

** Modèle ayant tourné avec une hypothèse d'anticipation parfaite sur la VTC pour des valeurs pour des puits compris entre 85 MtCO₂e et 95 MtCO₂e.

Note : pour chaque date, la colonne de gauche correspond à l'hypothèse de puits la plus favorable (95 MtCO₂e) et la colonne de droite à l'hypothèse de puits la moins favorable (75MtCO₂e)²

La moyenne des résultats des modèles est à considérer avec précaution au vu des différences structurelles de fonctionnement de ces modèles.

Source : simulations des modèles

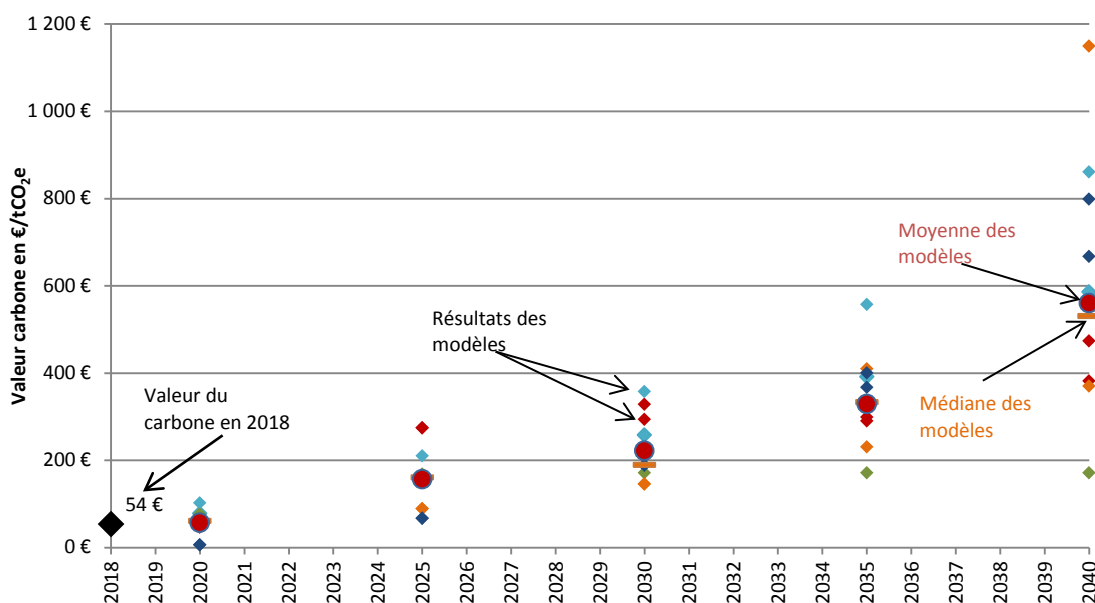
¹ Voir par exemple le Cinquième Rapport du GIEC (2014) ou le chapitre 2 du dernier rapport *Global Warming of 1,5 °C*.

² TIMES attribue une valeur plus faible à court terme dans le cas le moins optimiste (288 € contre 322 €) mais l'augmentation de cette valeur sur la fin de période est nettement plus élevée que sous l'hypothèse optimiste de puits.

Sur la base de ces différentes modélisations, le tableau ci-dessus met en évidence deux points saillants.

- À l’horizon 2030, les modèles affichent des valeurs du carbone comprises entre 143 € et 351 €. Les écarts sont d’ampleur modérée et principalement liés à la catégorie de modèles : les modèles technico-économiques TIMES et POLES, affichent des valeurs plus élevées que les modèles macroéconomiques IMACLIM, ThreeME et NEMESIS, (moyennes respectives de 300 € et 165 €).
- Bien qu’ils soient construits sur des principes totalement différents, tous les modèles affichent une trajectoire de valeur carbone croissant tout au long de la période d’aujourd’hui à 2050, à un rythme largement supérieur au taux d’actualisation, tel que serait préconisé par une règle de Hotelling. Ce taux de croissance reflète deux phénomènes bien distincts :
 - le choix de lisser les efforts de réduction des émissions de GES sur l’ensemble de la période, la trajectoire de la valeur carbone reflétant alors l’accroissement des coûts marginaux d’abattement dans le processus de décarbonation de l’économie ;
 - la difficulté de simuler en fin de période un scénario de décarbonation profonde, les modèles, quelle que soit leur nature, peinant à simuler les changements radicaux nécessaires à cette décarbonation profonde de l’économie, si bien que la valeur du carbone obtenue tend à « s’envoler » pour tenter d’atteindre l’objectif.

Figure 25 – Valeurs carbone obtenues par les modèles jusqu’en 2040



Source : simulations des modèles

Des résultats de modèles exploitables jusqu'au facteur 4

Les modèles, au-delà de leurs différences de spécification, donnent des ordres de grandeur raisonnablement convergents et robustes sur la première partie de période de projection. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne dans le temps, ces modèles éprouvent en revanche des difficultés croissantes à simuler les réductions d'émissions de GES nécessaires pour atteindre la neutralité carbone. Cela s'explique en partie par les limitations intrinsèques aux modèles :

- certains modèles sont par essence « conservateurs » : ils se réfèrent à l'observation des comportements passés et ne peuvent décrire des changements de nature plus systémique. Du côté de la demande, cette limitation se traduit dans les modèles par des élasticités aux prix relatifs stables et modérées, même lorsque les modèles se rapprochent de la zone « zéro émissions » ;
- du côté de l'offre, les modèles ne peuvent pleinement appréhender tous les aspects fondamentaux du processus d'innovation. En particulier, ils n'intègrent que partiellement les effets d'apprentissage liés à la fois au déploiement des technologies (*learning by doing*) et aux investissements en R & D sur ces technologies (*learning by researching*). Cette limitation rend particulièrement difficile la projection des prix de bascule futurs (*switching prices*) des technologies aujourd'hui non matures mais qui seront indispensables à l'atteinte de la neutralité carbone. Les modèles ne peuvent *a fortiori* pas anticiper, au-delà d'une tendance de progrès incrémental, les innovations de rupture ;
- enfin, les simulations se faisant à politique inchangée, les modèles n'incorporent pas de changements structurels dans l'organisation de l'espace et l'usage des sols.

Au total, comme le montre la figure 26 qui présente les niveaux de valeur carbone en fonction des niveaux d'émissions atteints (en pourcentage des niveaux de 1990) pour les différents modèles :

- **diviser les émissions par deux par rapport à 1990 implique des valeurs carbone très convergentes entre les modèles, comprises entre 175 € et 250 €** Les résultats restent convergents jusqu'à un niveau de réduction des émissions de l'ordre de 60 % par rapport à 1990. Les valeurs à ce niveau sont comprises entre 300 et 450 €/tCO_{2e}¹ ;

¹ On exclut ici le modèle IMACLIM où la relation valeur carbone-niveau d'émissions atteint est trop dépendant de la trajectoire du fait des anticipations.

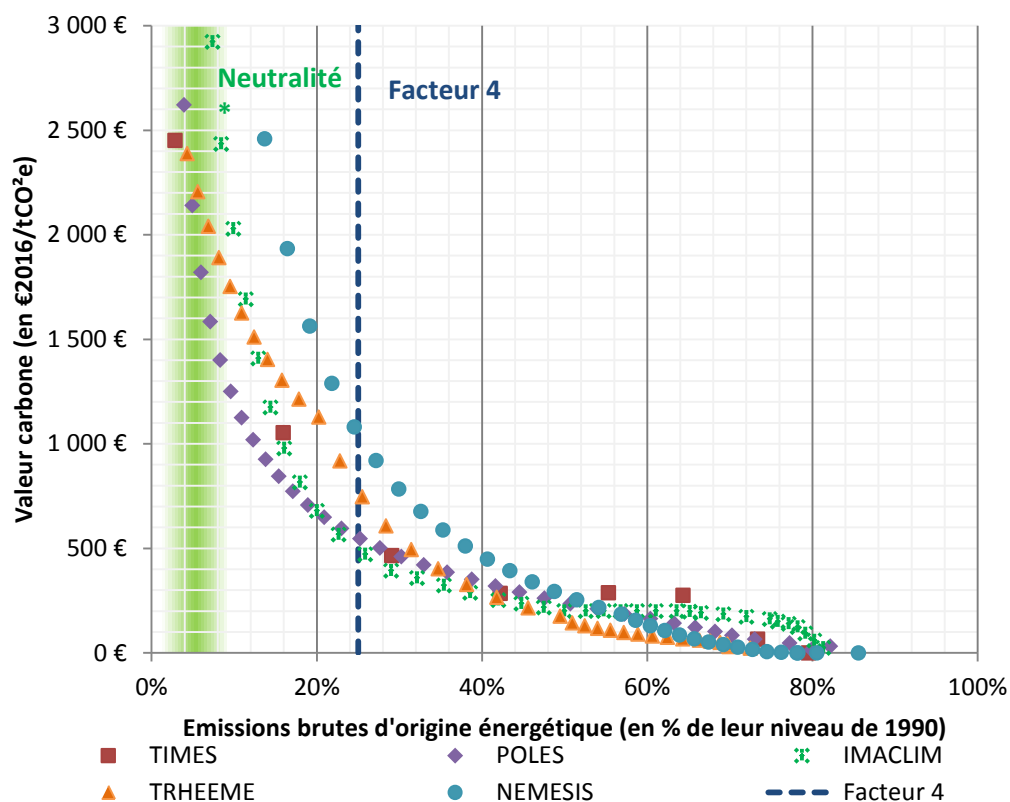
- **les écarts entre les résultats s'accroissent mais restent en partie explicables jusqu'autour de 2040, lorsqu'on s'approche du facteur 4** – c'est-à-dire la division par quatre des émissions par rapport à 1990 ;
- **ensuite, la pente de la trajectoire de valeur tutélaire s'accroît fortement pour tous les modèles et les écarts entre modèles s'accroissent sensiblement**, traduisant la difficulté, voire l'impossibilité, d'atteindre la neutralité carbone sur la seule base des mécanismes inclus dans ces modèles.

Outre la simple observation de la « flambée » de la valeur carbone simulée, les modèles macroéconomiques décrivent en fin de période une décarbonation davantage associée à une baisse de production qu'à un découplage entre la production et les émissions de GES¹.

Sur la base de cette analyse des résultats, **la commission a estimé que les modèles donnaient une perspective robuste de la trajectoire de valeur tutélaire du carbone requise jusqu'à une réduction d'émissions proche du facteur 4** (division par 4 des émissions de GES par rapport à 1990), mais que l'exploitation des résultats produits au-delà pour l'évaluation de la valeur tutélaire du carbone n'était pas pertinente. La capacité à décarboner en profondeur l'économie pour atteindre la neutralité carbone appelle en effet des politiques structurantes (aménagement et usage des sols notamment), un besoin d'innovation et une coordination internationale plus difficiles à modéliser.

¹ En considérant l'équation $E = E/Y \times Y$, avec E le flux d'émissions de GES et Y le PIB, la contribution du découplage correspond à la contribution de la variation de E/Y dans la variation de E et celle de la variation de la production à la variation de Y.

Figure 26 – Valeurs carbone des modèles en fonction des niveaux d'émissions atteints par rapport à 1990



Note : pour des raisons de lisibilité, les valeurs affichées ici sont celles obtenues par les simulations sous l'hypothèse de puits UTCF de 75 MtCO₂e (85 MtCO₂e pour IMACLIM) ; les courbes obtenues par les trajectoires sous une hypothèse de puits 95 MtCO₂e diffèrent peu de celles-ci, sauf pour ThreeME.

La courbe correspondant au modèle IMACLIM représente la version myope, la version avec anticipations parfaites sur la valeur carbone ne permet pas d'établir cette courbe.

* La neutralité carbone correspond ici à l'objectif de réduction des émissions d'origine énergétique compatible avec des hypothèses de puits comprises entre 75 MtCO₂e et 95 MtCO₂e.

Source : calcul des auteurs à partir des résultats de simulation des modèles

1.2. La prospective technologique

Des exercices de prospective technologique sont conduits à l'échelle mondiale notamment par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), pour ce qui concerne les technologies liées à la production et l'usage de l'énergie, ou au niveau national dans plusieurs pays, notamment au Royaume-Uni, en Allemagne et en France dans le cadre de la préparation de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC). Les exercices permettent d'apprécier les dates d'apparition probables des différentes technologies de décarbonation, leur vitesse de déploiement et l'évolution de leurs coûts – et *in fine* les

prix de bascule (*switching prices*) des usages carbonés vers des usages décarbonés (voir encadré 7 ci-dessous).

Ces études prospectives sur les technologies disponibles servent à identifier les technologies marginales les plus coûteuses nécessaires à la décarbonation profonde des activités humaines. À l'horizon 2050, la valeur carbone doit logiquement refléter le coût probable des technologies structurantes les plus chères pour atteindre l'ambition.

Le tableau ci-dessous présente, à partir de sources variées, des coûts d'abattement associés à quelques technologies structurantes pour les émissions d'origine énergétique. D'après ces résultats, un nombre important de technologies pourrait être enclenché à moins de 100 €/tCO₂e d'ici à 2050. Les technologies permettant d'élargir de façon significative le potentiel d'abattement, telles que les technologies « *power to X* », affichent des coûts plus élevés, compris entre 300 € et 600 € par tonne de CO₂e abattue.

Tableau 9 – Coûts d'abattement associés à quelques technologies structurantes pour les émissions d'origine énergétique

Technologie		Coût par tCO ₂	Source	
Combustion gaz naturel + CSC	Inclut 10 \$/t pour transport-stockage	40-73 €/t	IEAGHG 2017	Technical Report, Overview Book
Électricité gaz ou charbon + CSC		< 100 €/t	AIE 2017	AIE ETP 2017, figure 6.16
Cimenterie = capture CO₂	Première fourchette avec oxy-combustion	55-70 \$/t	AIE 2018	Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry
	Seconde fourchette avec post-combustion	90 -150 \$/t		
Acierie + capture CO₂		60-80 \$/t	AIE 2011	Technology Roadmap CCS in Industrial Applications
Électricité biomasse + CSC	Centrale électrique biomasse = capture CO ₂ , avec émissions nettes négatives de – 75 g/kWh	250 \$/t	AIE 2017	AIE ETP 2017, figure 6.16
H₂ + capture	Hydrogène fabriqué par vapo-reformage = CSC	47-70 €/t	IEAGHG 2017	Technical Report février 2017
Power to gas	H ₂ électrolytique = capture de CO ₂ pour formation combustible gazeux ou liquide	307 €/t	DENA 2018	Deutsche Energie Agentur Leitstudie. Impulse für die Gestaltung des Energie systems bis 2050 Integrierte Energiewende
Power to liquid		311 €/t		
Capture CO₂ air	Capture du CO ₂ directe dans l'air (DAC)	85 €/t**		
Power to gas	H ₂ par électrolyse puis méthanation pour usage chauffage (substitue gaz naturel)	570 €/t**	Agora Energie-wende	Agora SynKost Study et FVVH1086 Renewables in Transport 2050 – Kraftstoffstudie II
Power to liquid	H ₂ par électrolyse puis transformation en carburant pour mobilité (substitue pétrole)	470 €/t**		

* Coût cible par tonne de CO₂ capturée, accessibles à 5-10 ans pour certains, d'ici 2040-2050 pour d'autres.

** Calcul à partir de données Agora Energiewende et des hypothèses sur le coût de l'électricité (80€/MWh), un électrolyseur utilisé 8 000 h/an, absence de stockage de H₂.

Source : contribution de F. Dassa et J.-M. Trochet, EDF (voir Compléments)

Réduire les émissions d'origine non énergétique dans le secteur agricole de 33 % par rapport à leur niveau de 1990, c'est-à-dire atteindre l'objectif prévu pour 2030, nécessiterait de mobiliser des technologies dont les coûts d'abattement seraient de l'ordre de 250 €/tCO₂e¹ à 500 €/tCO₂e². L'atteinte de l'objectif – 50 % sur le secteur par rapport aux émissions de 1990 devrait donc impliquer des coûts encore supérieurs.

Pour l'ensemble des secteurs, les coûts d'abattement liés aux technologies ne représentent que des coûts directs, sous l'hypothèse d'une utilisation optimale de ces technologies, et n'intègrent pas les contraintes associées à leur déploiement : modification du système productif, réallocations sectorielles, reconversions et transitions professionnelles, effets de tension sur ces technologies si elles devaient être utilisées de façon intensive. La prise en compte de ces contraintes et des coûts de transition pourrait accroître, au vu des résultats des modèles, ces coûts directs de l'ordre de 30 %.

Au total, la commission retient l'hypothèse qu'avec une plage de valeur tutélaire de 600 à 900 €/tCO₂e en fin de période, il est possible de rentabiliser un portefeuille de technologies structurantes pour parvenir à l'objectif ZEN. Ces niveaux de coût sont bien entendu sujets à de grandes incertitudes et par précaution ne supposent pas l'apparition d'une technologie de rupture caractérisée à la fois par un faible coût et un potentiel élevé.

Encadré 7 – Certains secteurs sont dépendants de technologies aujourd'hui non matures

Les exercices de veille technologique font ressortir trois grands enseignements.

Près de la moitié des réductions d'émissions de GES pourra être réalisée en s'appuyant sur des technologies dont le coût d'abattement associé est inférieur à 250 €/tCO₂e.

Un grand nombre de solutions peuvent être déployées dès aujourd'hui à des coûts très limités, notamment dans le secteur du bâtiment, de la production d'énergie mais aussi dans l'industrie et l'agriculture. Pour ces solutions, seule la saturation des filières pourrait ralentir leur déploiement.

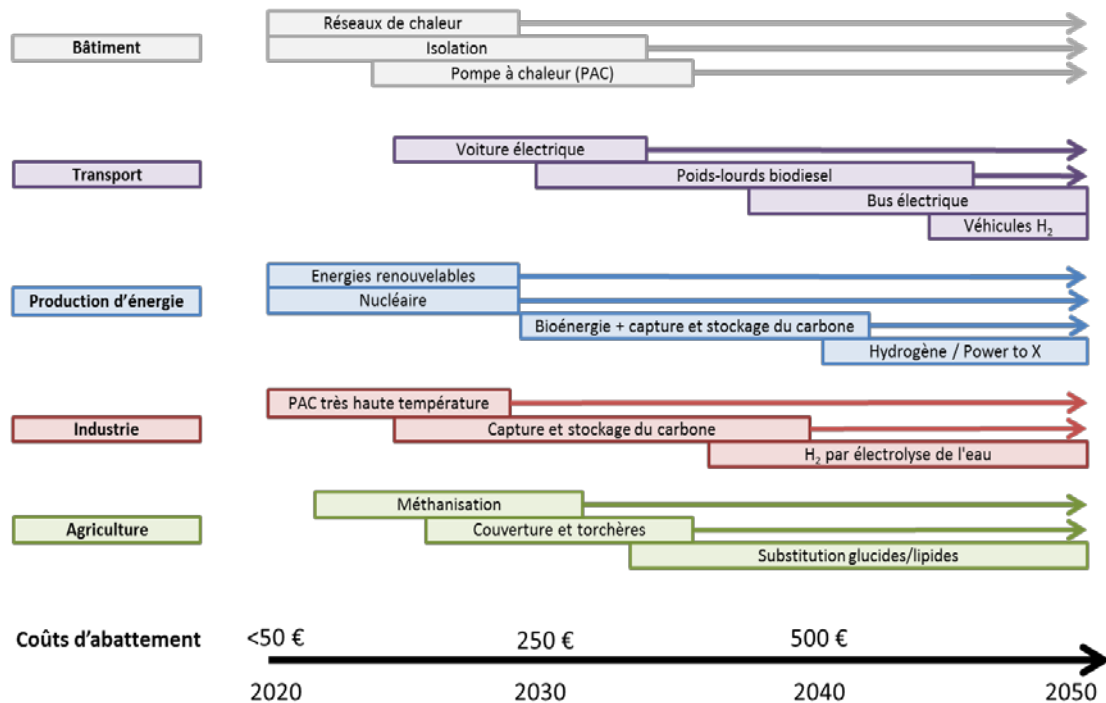
¹ Technologie 7A : modification de l'alimentation animale par le remplacement des sucres par des graisses insaturées et utilisation d'additifs dans l'alimentation des ruminants de sorte à réduire la teneur en protéines dans les rations.

² Technologie 4C : introduction de bandes enherbées qui jouent un rôle de tampon. Voir Pellerin *et al.* (2017), « Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture », *Environmental Science & Policy*, 77, p.130-139.

La décarbonation en profondeur de certains secteurs dépend en revanche de technologies aujourd’hui non matures avec des projections de coût d’abattement associé à ces technologies qui restent très élevées même à l’horizon 2050 (supérieures à 500 €/tCO₂e).

Le coût de déploiement des technologies non matures reste aujourd’hui entouré d’incertitudes importantes et varie selon les sources. Le tableau ci-dessous, largement inspiré des travaux de l’AIE, propose quelques ordres de grandeur des coûts d’abattement directement liés aux nouvelles technologies de décarbonation. Ces coûts directs ne tiennent pas compte des coûts sectoriels et macroéconomiques liés à leur déploiement à grande échelle dans l’économie.

Figure 27 – Coûts de déploiement de quelques technologies



Sources : ordres de grandeur définis par la commission à partir de diverses sources : Carbone 4 (2018), « Comment décarboner en profondeur et sans tarder le bâtiment, les transports et l'industrie ? » ; AIE (2017), « Energy Technology Perspectives 2017 » ; Pellerin et al. (2013), « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques », Rapport final, INRA

1.3. La sensibilité des résultats aux puits, aux comportements et aux coûts des technologies

Les hypothèses structurantes dans l'évaluation de la trajectoire de la valeur carbone ont fait l'objet de tests de sensibilité :

- le montant effectif des émissions à abattre, lié en particulier aux hypothèses de puits UTCF ;
- le contexte international de la lutte contre le changement climatique ;
- les comportements des acteurs ;
- le progrès technique.

Cette section présente les résultats de ces analyses de sensibilité.

La sensibilité de la valeur à l'objectif d'abattement

La sensibilité aux puits UTCF

Les simulations ont toutes été réalisées sous au moins deux hypothèses de potentiel de puits UTCF, l'une à 95 MtCO_{2e} et l'autre à 75 MtCO_{2e}¹. Dans chaque scénario, la capacité des puits monte progressivement en charge jusqu'à atteindre son potentiel maximal en 2050. Le tableau 3 reporte les écarts relatifs de valeur carbone obtenus en fonction de ces hypothèses de puits. À l'horizon 2030, les écarts de capacité des puits restent modérés entre les scénarios et la variabilité de la valeur carbone en fonction de cette hypothèse reste faible, de l'ordre de +/- 5 %. Elle augmente ensuite à mesure que les écarts de puits se creusent : elle atteindrait un ordre de grandeur moyen de +/- 10 % à 20 % en 2040. Au-delà de 2040, la dispersion des modèles renvoie à des écarts très variables et peu robustes. Toutefois, une sensibilité de l'ordre de +/- 20 %, voire supérieure, apparaît très probable.

¹ 85 MtCO_{2e} pour IMACLIM.

Tableau 10 – Variation de la valeur carbone en fonction des potentiels probables de puits

		2030	2035	2040
Technico-économiques	TIMES	6 %	1 %	11 %
	POLES	16 %	17 %	19 %
Macroéconomiques sectoriels	IMACLIM*	0 %	0 %	0 %
	ThreeME*	0 %	28 %	51 %
	NEMESIS	0 %	4 %	9 %

Lecture : ce tableau donne l'ampleur des variations relative de la valeur carbone autour d'une valeur centrale pour des hypothèses de puits UTCF allant de 75 MtCO₂e à 95 MtCO₂e. La valeur carbone obtenue par le modèle POLES en 2040 peut varier de +/-19 % autour de la valeur centrale (85 MtCO₂e) en fonction des potentiels de puits UTCF (de +/-10 MtCO₂e autour de 85 MtCO₂e). Les résultats de modèles étant considérés comme pertinents seulement jusqu'à l'horizon 2040, les résultats pour les dates ultérieures ne sont pas présentés.

* Les variations nulles affichées par le modèle IMACLIM sont biaisées par rapport aux autres modèles par le mécanisme d'anticipation qui reporte ces variations en fin de période. L'importance des écarts de valeurs déduits des simulations de ThreeME sous différentes hypothèses de puits sont par ailleurs difficilement explicables.

La sensibilité des résultats au contexte international de la lutte contre le changement climatique

Le degré de mobilisation et le niveau de coopération internationale dans la lutte contre le réchauffement climatique influence la valeur carbone française *via* au moins quatre canaux :

- la possibilité de répartition des efforts nationaux de maîtrise des émissions (*via* notamment les effets d'un système international de permis d'émissions et d'exploitation de puits de carbone étrangers) ;
- le prix des ressources et en particulier des énergies fossiles ;
- les termes de l'échange et la compétitivité du pays ;
- et l'innovation.

L'analyse de la sensibilité des résultats aux hypothèses faites sur ce contexte international a donc été décomposée de sorte à identifier la sensibilité propre à chacun de ces canaux.

La possibilité de coopération internationale

Une action coordonnée des différents pays permet de répartir de façon efficace les efforts en exploitant en priorité les gisements à faible coût. Une partie des actions françaises de réduction des émissions pourrait potentiellement s'appuyer sur des

gisements étrangers. Il serait dans ce cas possible de compenser certaines émissions de GES sur le sol français par des projets de réduction d'émissions à l'étranger, plutôt que d'éliminer la totalité des émissions produites sur notre territoire si le coût marginal d'abattement s'avérait très élevé.

Si un club de pays décidait d'organiser une meilleure intégration des efforts, la valeur carbone pourrait donc être modérée, soit parce qu'on pourrait bénéficier de puits étrangers, soit parce qu'on pourrait acheter des permis plutôt que de réaliser les efforts les plus coûteux¹. Prendre en compte une telle possibilité revient alors à postuler des puits de carbone plus élevés. À titre illustratif, un mécanisme de flexibilité permettant de recourir à des puits étrangers pour 10 MtCO₂e réduirait la valeur de l'ordre de 10 %.

Le prix des énergies fossiles

Un contexte mondial où les efforts pour limiter le réchauffement climatique seraient plus importants aurait pour conséquence de réduire la demande pour les énergies fossiles, donc leur prix. Or, un prix plus faible de ces énergies accroît les incitations à les utiliser davantage. Cet *effet rebond* nécessite d'appliquer des actions d'abattement plus importantes en retour. Les hypothèses de référence qui ont été retenues sur les prix des énergies fossiles reposent sur le scénario central de l'AIE, correspondant au seul respect des engagements nationaux², engagements insuffisants pour maintenir le réchauffement climatique sous les 2 °C. Il est donc probable que dans un contexte où le monde intensifierait son action dans la lutte contre le réchauffement, les prix effectifs des énergies fossiles seraient maintenus à des niveaux plus faibles que ceux envisagés dans ce scénario. Des variantes ont été réalisées avec les modèles TIMES et NEMESIS en retenant les hypothèses de prix des énergies fossiles du scénario de l'AIE dans lequel les efforts mondiaux permettent de limiter le réchauffement sous les 2 °C³.

Le passage d'une hypothèse de prix du pétrole à 91 € en 2030 et 105 € en 2040 à une hypothèse de prix à 62 € en 2030 et 58 € en 2040 – soit une réduction de 30 % à 45 % – conduirait à une hausse de la valeur du carbone de 3 à 15 € en 2030 et de 34 à 50 € en 2040 (voir tableau 11). La valeur du carbone apparaît donc relativement peu sensible aux incertitudes sur le prix des énergies fossiles, avec des variations inférieures à 10 %.

Outre la baisse du prix des énergies fossiles, une action mondiale renforcée pourrait aussi entraîner des tensions sur le marché des matières premières nécessaires à la production des technologies bas carbone et enchérir leur prix. Ce second mécanisme

¹ Tirole J. (2009), *Politique climatique, une nouvelle architecture internationale*, rapport n° 87 pour le Conseil d'analyse économique.

² Scénario dénommé « *New policies scenario* » par l'AIE.

³ Scénario dénommé « *Sustainable development scenario* » par l'AIE.

n'est pas évalué spécifiquement dans cette analyse et viendrait amplifier la hausse de la valeur du carbone induite par la baisse du prix du pétrole.

**Tableau 11 – Augmentation de la valeur carbone
suite à une prise en compte d'hypothèses de prix des énergies fossiles**

		2030	2040
TIMES	Écart en €	+ 3 € à 20 €	+ 34 €
	Écart en %	+ 1 % à 7 %	+ 7 % à 9 %
NEMESIS	Écart en €	+ 14 €	+ 50 €
	Écart en %	+ 7 % à 8 %	+ 6 % à 8 %
Prix du pétrole	Prix scénario <i>New policies</i>	91 €	105 €
	Prix scénario <i>Sustainable development</i>	62 €	58 €
	Écart en €	- 29 €	- 47 €
	Écart en %	- 32 %	- 45 %

Note : comparaison de la valeur carbone obtenue selon que les hypothèses de prix des énergies fossiles sont celles du scénario « New policies » ou celles du scénario « Sustainable development » de l'AIE. Les écarts présentés sont définis de la façon suivante :

Écarts en euros : VC (Sustainable development) – VC(New policies)

Écarts en pourcentage : [VC (Sustainable development) – VC(New policies)]/ VC(New policies)

Les écarts varient selon les scénarios de puits.

La compétitivité

Le troisième canal passe par le biais des variations de compétitivité. Une action internationale renforcée aurait pour effet de protéger la compétitivité des secteurs exposés français et de réduire aussi le risque de « fuites » de carbone. C'est un enjeu économique essentiel mais qui aurait peu d'incidence sur la valeur tutélaire du carbone, l'effort pour atteindre le « zéro émissions nettes » étant globalement inchangé.

L'innovation

L'innovation est probablement le vecteur d'influence du contexte international sur la valeur tutélaire du carbone le plus important. En effet, une mobilisation mondiale forte permettrait d'élargir la base des efforts de R & D, d'accroître la probabilité de découvertes et de déployer les innovations à grande échelle, avec à la clé des baisses de coût significatives.

La sensibilité des résultats aux prospectives technologiques

Dans un scénario de coopération internationale forte permettant de mettre effectivement en œuvre l'Accord de Paris avec un objectif de limiter le réchauffement climatique sous les 2 °C, voire 1,5 °C, les technologies décarbonées devraient être déployées à grande échelle et bénéficier de baisses de coûts d'autant plus importantes que le taux d'apprentissage qui leur est associé est élevé. Ce « taux d'apprentissage » ou « *learning rate* » (LR) traduit la baisse de coût associée à chaque doublement du nombre cumulé d'équipements produits. Il est en général compris entre 5 % et 25 %¹ et reflète simultanément un effet d'échelle (amortissement de coûts fixes de R & D) et des effets d'apprentissage (plus grande efficacité de la production).

La valeur tutélaire du carbone dépend pour une large part du rythme de déploiement des technologies – ou plus généralement des systèmes technologiques. La figure 28 décrit de façon stylisée la détermination d'une trajectoire de valeur tutélaire et, corrélativement, la mobilisation des technologies par ordre de mérite en fonction des émissions à abattre et du coût des technologies disponibles T1, T2 et T3 (figure de gauche) : lorsque la valeur tutélaire du carbone devient supérieure au coût d'abattement lié à la technologie Ti, celle-ci peut être déployée. La trajectoire de réduction des émissions est déterminée par le déploiement de ces technologies (figure de droite).

Dans ce contexte, une innovation peut avoir deux types d'impacts :

- elle peut permettre de baisser la trajectoire de valeur tutélaire compatible avec le respect du même budget (ou la même trajectoire) ;
- elle peut également permettre de déployer plus tôt la technologie concernée.

L'analyse de sensibilité présentée ici repose sur deux types d'études de cas : celui des technologies intermédiaires ou de « mi-parcours » ; celui des technologies aujourd'hui non matures dites « ultimes » car elles permettraient de franchir la « dernière marche » vers la décarbonation de l'économie.

Cas des technologies « mi-parcours » ou des innovations incrémentales

La figure 28 illustre l'impact d'une baisse de coût sur une technologie qui devra être déployée à « mi-parcours » : la technologie en question (T2) pourrait être déployée plus tôt, et les émissions être réduites plus précocement. De fait les technologies plus

¹ Les modules des panneaux photovoltaïques ont bénéficié d'un taux d'apprentissage supérieur à 20 % sur les trente dernières années, l'énergie éolienne d'un taux autour de 15 %. Pour une revue des taux d'apprentissage voir par exemple Rubin *et al.* (2015), « A review of learning rates for electricity supply technologies », *Energy Policy*, vol. 86, novembre, p. 198-218..

coûteuses (T3) peuvent être déployées plus tardivement, tout en respectant le même budget carbone. La trajectoire de valeur tutélaire peut alors être abaissée en conséquence, l'effet sur la valeur de fin de période restant d'ampleur modérée.

L'étude de cas, détaillée dans le Complément 11 au rapport¹, porte sur le secteur des transports et présente l'impact de différents scénarios mondiaux sur la rentabilité relative de trois technologies concurrentes : le véhicule à moteur à combustion interne (ICE), le véhicule électrique à batterie (BEV) et le véhicule à pile à combustible hydrogène (FCEV). L'analyse de sensibilité réalisée consiste à comparer les valeurs de bascule des technologies décarbonées selon les hypothèses i) de déploiement de ces technologies au niveau mondial et ii) de taux d'apprentissage compris entre 15 % et 25 %. Elle montre que, pour une valeur du carbone donnée, un scénario mondial favorable (Beyond 2 °C) combiné à un taux d'apprentissage élevé (25 %) conduit à rendre les technologies non émettrices de GES (BEV et FCEV) moins coûteuses que la technologie émettrice (ICE) bien plus tôt qu'un scénario mondial moins ambitieux (NDC) combiné à un taux d'apprentissage modéré (15 %).

Les effets d'apprentissage peuvent donc conduire, notamment dans le cas d'un scénario international favorable, à réduire significativement (de plus de moitié dans cet exemple) la valeur carbone nécessaire au déclenchement des technologies propres dans ce secteur.

Cas d'une technologie représentative des coûts d'abattement « ultimes » ou d'une innovation de rupture

L'impact d'une innovation de rupture est d'autant plus important que celle-ci porte sur les technologies les moins matures, les plus coûteuses et recélant un potentiel d'abattement important.

Son impact sur la valeur tutélaire du carbone dépend de multiples facteurs : l'ampleur de la réduction des coûts qu'elle permet bien sûr, mais aussi le potentiel de la technologie concernée et la date à laquelle elle apparaît. L'impact d'un progrès technique de ce type conduit à déployer plus tôt la technologie « ultime » (T3) et, si cette baisse de coût est connue suffisamment tôt, à étaler davantage les efforts précédents (T1 et T2) (voir figure 30, gauche), le tout en respectant le même budget carbone (figure 30, droite).

Contrairement au cas précédent, l'innovation sur les technologies ultimes rend possible une baisse beaucoup plus franche de la valeur tutélaire du carbone en fin de période, ces technologies représentant un potentiel d'abattement élevé et un différentiel de prix

¹ Voir le Complément 11, « Valeur tutélaire du carbone et environnement international de décarbonation » par Patrick Criqui.

initial important avec les autres technologies. Des baisses d'un quart, voire d'un tiers, de la valeur à l'horizon 2050 seraient ainsi envisageables dans un contexte favorable de coopération internationale plus intense de lutte contre le changement climatique.

L'ordre de grandeur possible est illustré dans l'encadré ci-dessous. Cette étude de cas évalue le coût d'abattement associé à la technologie « power to gas » permettant le stockage de l'énergie selon les différents scénarios plausibles de déploiement de cette technologie identifiés par des études de prospective technologique et selon une fourchette de taux d'apprentissage de 5 % à 20 %.

**Encadré 8 – Illustration prospective pour une technologie non mature :
« power to gas »**

Selon des hypothèses « de meilleure technologie disponible » actuelles, il est possible de fabriquer aujourd'hui du méthane à partir d'hydrogène électrolytique (et d'électricité décarbonée) pour 207 €/MWh gaz (ordre de grandeur), soit presque dix fois plus cher que le prix de gros du gaz naturel aujourd'hui.

Le coût implicite actuel de la tonne de CO₂ évitée grâce à cette technologie serait donc de 770 €.

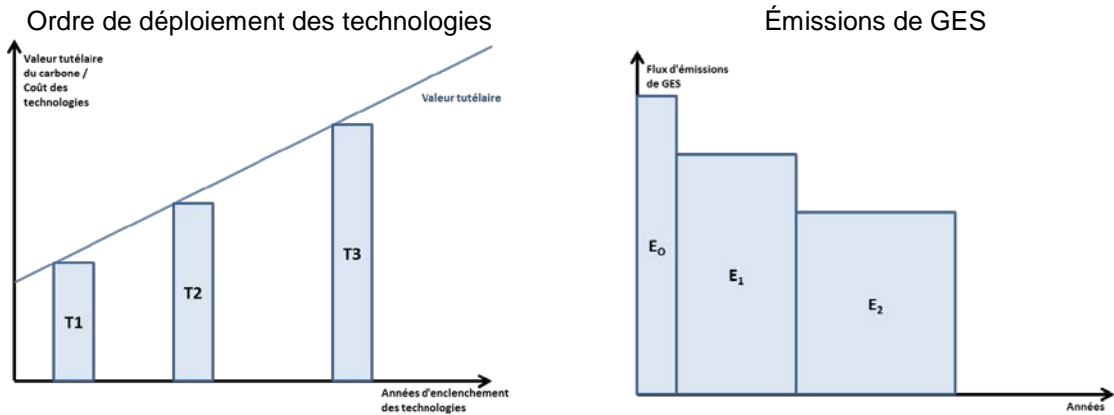
En 2050, selon les scénarios de coopération internationale (hypothèses conjointes de volumes déployés et de taux d'apprentissage) le coût d'abattement lié à cette technologie pourrait être largement réduit.

Dans le cas d'un scénario 3 °C insuffisamment coopératif et conservateur sur le progrès technique (taux d'apprentissage de 5 %), le coût associé des émissions de CO₂ évitées serait proche de 600 €/tCO_{2e} (les équipements, électrolyseur et méthaneur, seraient 25 % moins chers, avec un coût total de 170 €/MWh).

Dans un scénario 2 °C coopératif, impliquant un déploiement plus large de la technologie, et sous des hypothèses optimistes sur le progrès technique (taux d'apprentissage de 20 %), le coût associé des émissions de CO₂ évitées pourrait en revanche être abaissé à 470 €/tCO_{2e} (le prix des équipements pouvant être abaissé de 75 %).

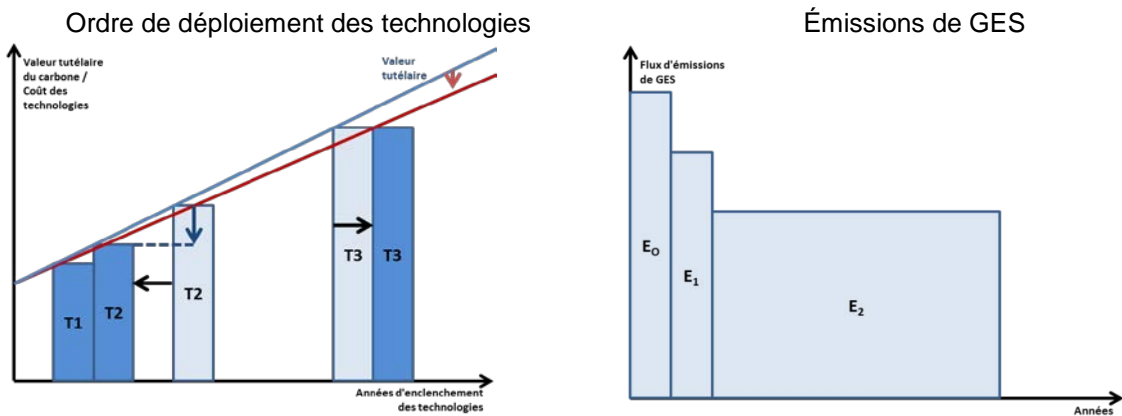
Sources : calculs réalisés à partir de données issues de Frontier Economics Ltd 2018, « The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels », commissioned by Agora Energiewende et Agora Verkehrswende ; FVV 2016, « Renewables in Transport 2050 », Forschungsvereinigung Verbrennungskraft-maschinen e. V. ; et d'hypothèses pour le coût de l'électricité et le taux d'actualisation (4,5 %).

Figure 28 – Déploiement des technologies et réduction des émissions dans le scénario initial



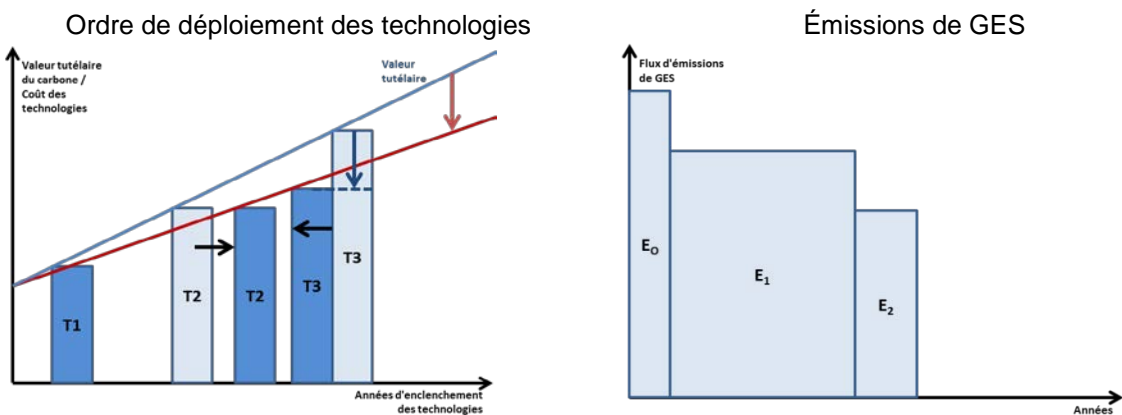
Source : France Stratégie, les auteurs

Figure 29 – Impact d'une innovation sur une technologie intermédiaire



Source : France Stratégie, les auteurs

Figure 30 – Impact d'une innovation sur les technologies « ultimes »



Note : $E_0 + E_1 + E_2 = B$ où B est le budget carbone pour la France, identique dans les trois cas.

Source : France Stratégie, les auteurs

La sensibilité des résultats aux comportements des agents

Les modèles macroéconomiques utilisés sont des modèles estimés ou calibrés sur les comportements présents et passés des agents économiques. Ils ne peuvent donc par construction anticiper correctement les changements de comportement des agents face à un défi de grande ampleur. Or, il est possible que par une prise de conscience sociétale des enjeux de la lutte contre le changement climatique et par des actions publiques efficaces de sensibilisation, la sensibilité au prix relatif devienne plus forte.

Des tests de sensibilité ont été réalisés avec le modèle NEMESIS en considérant une augmentation des élasticité de substitution entre les produits énergétiques, c'est-à-dire une augmentation de la réactivité des agents économiques aux prix relatifs de l'énergie. Dans ces variantes, les ménages et les entreprises substituent plus vite des énergies décarbonées aux énergies fossiles lorsque les prix relatifs se modifient. Des variantes avec un doublement de ces élasticité et avec une augmentation de 50 % de celles-ci sont considérées. Pour un doublement :

- au niveau des ménages, l'élasticité de substitution entre sources d'énergie carbonées et décarbonées au niveau des ménages est approximativement augmentée de 0,4 à 0,8 ;
- au niveau des entreprises, l'élasticité de substitution entre l'électricité et les autres énergies est augmentée de 0,7 à 1,4 et, au sein des autres énergies, l'élasticité de substitution est accrue de 0,5 à 1.

Les tests de sensibilité suggèrent qu'une telle augmentation de la sensibilité au prix des énergies carbonées permettrait de réduire de 20 % à 30 % la valeur carbone pour un doublement des élasticité de substitution et de 15 % pour une augmentation de 50 % de ces élasticité (voir tableau 12).

Tableau 12 – Sensibilité de la valeur carbone au changement de comportement des agents

	Impact sur la valeur tutéaire
Doublement des élasticité	Baisse d'un tiers de la valeur
Élasticité augmentées de 50 %	Baisse d'environ 15 % de la valeur

Source : calcul des auteurs à partir des simulations du modèle NEMESIS. Le changement de comportement considéré correspond à une augmentation de la sensibilité des agents aux prix de l'énergie. Sa mise en œuvre est traduite par un doublement ou une augmentation de 50 % des élasticité de substitution entre les produits énergétiques

Synthèse du champ des incertitudes

Les sensibilités des résultats aux différentes sources d'incertitudes analysées sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 13 – Synthèse des tests de sensibilité

	Variante	Impact sur la valeur tutélaire		
		2030	2040	2050
Puits UTCF / achat de permis à l'étranger	+/- 10 MtCO ₂ e de puits autour de l'hypothèse centrale de 85 MtCO ₂ e	Écart de l'ordre de +/- 5 % autour de la valeur centrale	Écart de l'ordre de +/- 10 à 20 % autour de la valeur centrale	Écart probable de +/- 20% autour de la valeur centrale
Prix des énergies fossiles	Prise en compte du scénario <i>sustainable development</i> de l'AIE (-47 €, soit une division par deux en 2040 par rapport au scénario central <i>New policies</i>)	Augmentation de la valeur tutélaire de l'ordre de 6 % à 8 %		
Compétitivité	Pas de variante modélisée	Impact sur les variables macroéconomiques non sur la valeur tutélaire		
Progrès technologique	Études de cas hors modèle. Prise en compte de scénarios alternatifs avec des taux d'apprentissage variant de 5 % à 20 % sur les technologies marginales et des déploiements technologiques internationaux plus ou moins intensifs	Impact faible	Impact modéré	Impact élevé Baisse possible de plus d'un tiers de la valeur tutélaire par rapport aux hypothèses centrales
Comportement des agents	Augmentation de 50 % des élasticités de substitution entre les énergies carbonées et décarbonées	La hausse de 50 % des élasticités de substitution entre les énergies montre une baisse d'environ 15 % de la valeur tutélaire		

Source : France Stratégie, les auteurs

2. L'investissement constitue l'enjeu principal d'une transition réussie vers la neutralité carbone

2.1. Les évolutions sectorielles

La structure des réductions par source d'émission

Si la valeur carbone s'applique à l'ensemble des émissions de façon uniforme, les réductions d'émissions ne sont pas réparties de façon proportionnelle entre les sources d'émissions, du fait de possibilités d'abattement très différentes. Tandis que les émissions brutes d'origine énergétique peuvent être quasi intégralement supprimées, il est peu probable que celles d'origine agricole puissent être réduites de plus de moitié,

celles issues des procédés industriels de plus des trois quarts et celles liées au traitement des déchets de plus des quatre cinquièmes par rapport à leur niveau de 1990. Sous des hypothèses de puits UTCF allant de 75 MtCO₂e à 95 MtCO₂e, la réduction totale des émissions brutes pour atteindre la neutralité nette en 2050 correspondrait donc à l'atteinte à cet horizon d'un facteur 6 à plus de 7 par rapport à 1990. Le tableau 14 et la figure 31 présentent la répartition supposée des efforts pour atteindre la neutralité carbone par source d'émissions de GES.

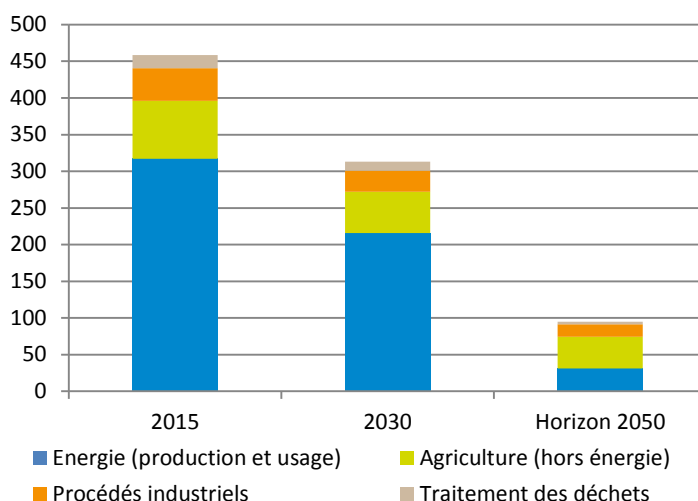
Tableau 14 – Les réductions d'émissions de GES par source d'émissions

Source d'émissions	Émissions 1990	Émissions 2030		Émissions 2050	
	MtCO ₂ e	MtCO ₂ e	% des émissions de 1990	MtCO ₂ e	% des émissions de 1990
Agriculture (hors énergie)	83	56	67 %	43	52 %
Procédés industriels	67	29	43 %	17	26 %
Traitement des déchets	19	12	63 %	4	21 %
Énergie	377	214	57 %	11-31 selon les puits	3 %-8 % selon les puits
Total	546	311	57 %	75-95 selon les puits	14 %-17 % selon les puits

Note : les puits correspondent aux puits UTCF.

Source : France Stratégie, calcul des auteurs à partir d'informations fournies par la DGEC, le CGDD et l'INRA

Figure 31 – Les flux d'émissions annuelles par source d'émissions* (en MtCO₂e)



* Sous l'hypothèse de puits UTCF de 95 MtCO₂e.

Source : France Stratégie, calcul des auteurs à partir d'informations fournies par la DGEC, le CGDD et l'INRA.

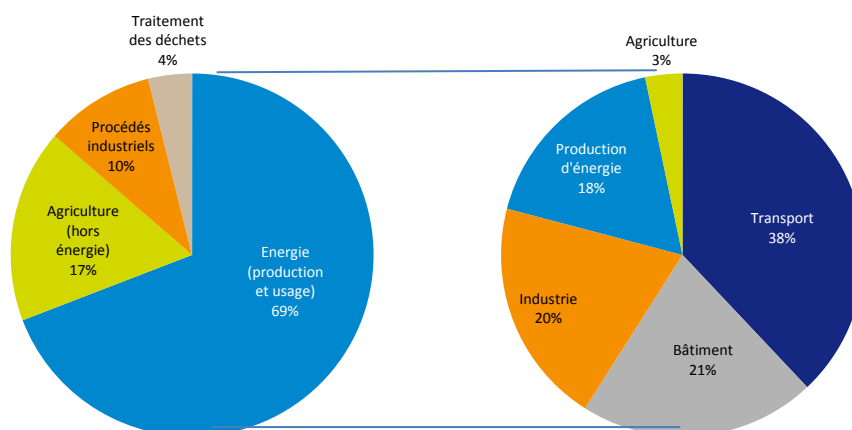
La répartition sectorielle des efforts de réduction des émissions d'origine énergétique

En 2015, les émissions de GES liées à l'utilisation et la production de l'énergie représentaient environ 70 % des émissions totales de GES hors UTCF (voir figure 32), soit 317 MtCO₂e. Le secteur des transports en est le plus gros émetteur et compte pour 38 % des émissions énergétiques, soit plus du quart des émissions totales de GES. Viennent ensuite le bâtiment (résidentiel et tertiaire) et l'industrie manufacturière, qui représentent chacun environ 15 % des émissions totales (soit plus de 20 % des émissions énergétiques) puis le secteur de production d'énergie pesant 12 % des émissions totales (18 % des émissions d'origine énergétique).

Atteindre la neutralité carbone en 2050 impliquerait de réduire les émissions d'origine énergétique à seulement 11 à 31 MtCO₂ en 2050 selon les hypothèses de puits UTCF, soit une diminution de 90 % à plus de 97 % par rapport à 2016. Cette décarbonation profonde de l'énergie, tant au niveau de l'usage que de la production, implique des réductions significatives dans tous les secteurs (voir figure 33).

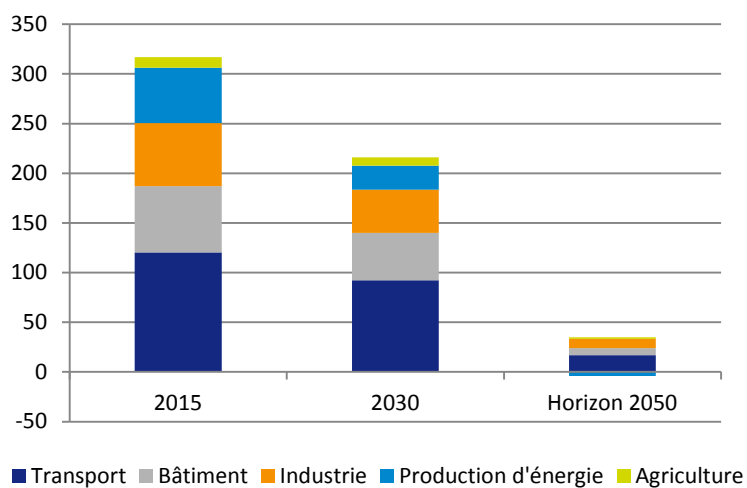
- Le secteur de production d'énergie pourrait atteindre des émissions négatives, à l'aide notamment du déploiement de la BioCSC, laquelle permettrait d'absorber des émissions d'autres secteurs.
- Les autres secteurs économiques se décarboneraient tous dans des proportions importantes.
- En volume, les secteurs du transport et du bâtiment tertiaire et résidentiel concentreront les plus gros montants d'abattement d'émissions de GES à réaliser.
- Les dynamiques de décarbonation sectorielles diffèrent fortement selon le modèle : certains modèles décarbonent tous les secteurs en parallèle, d'autres décarbonent les secteurs économiques successivement (voir figure 34).

Figure 32 – Répartition des émissions par source en France en 2015



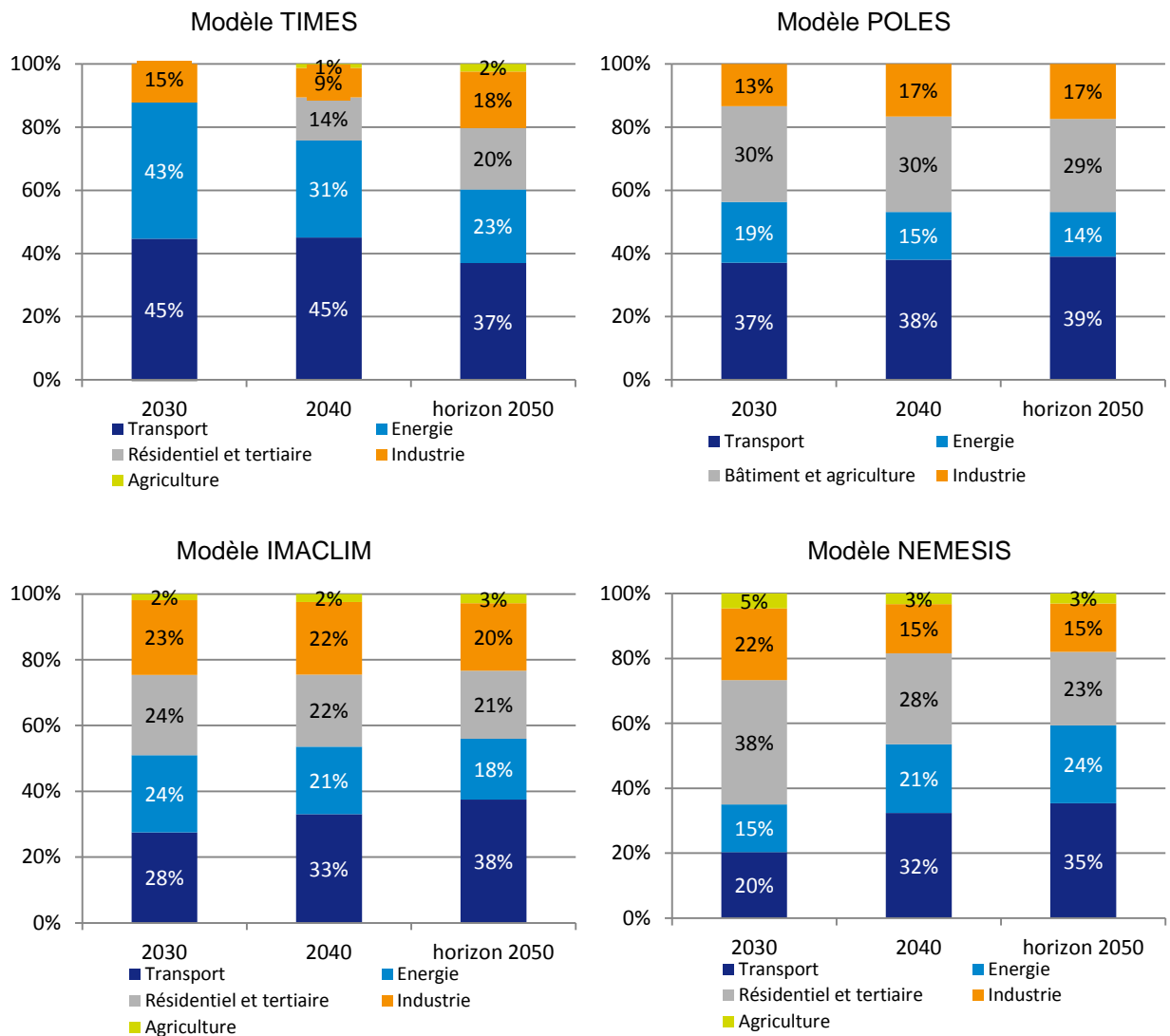
Source : chiffres DGEC, inventaire 2015 et données des modèles

Figure 33 – La décarbonation sectorielle des émissions d'origine énergétique (moyenne indicative des modèles en millions de tonnes de CO₂)



Source : calcul des auteurs à partir des données des modèles

Figure 34 – Contributions sectorielles à la réduction des émissions de CO₂ d'origine énergétique (en pourcentage de la réduction totale)



Source : simulations des modèles TIMES, POLES, IMACLIM et NEMESIS

2.2. Les grands leviers de convergence vers la neutralité carbone

La décarbonation de l'économie française reposera non seulement sur une allocation efficace des actions entre les secteurs mais aussi au sein de chaque secteur :

- sur une combinaison des deux leviers que sont l'amélioration de l'efficacité énergétique et la décarbonation de l'énergie utilisée ;
- sur des dépenses d'investissements permettant de « verdir » le capital déjà en service et de constituer un nouveau capital « vert ».

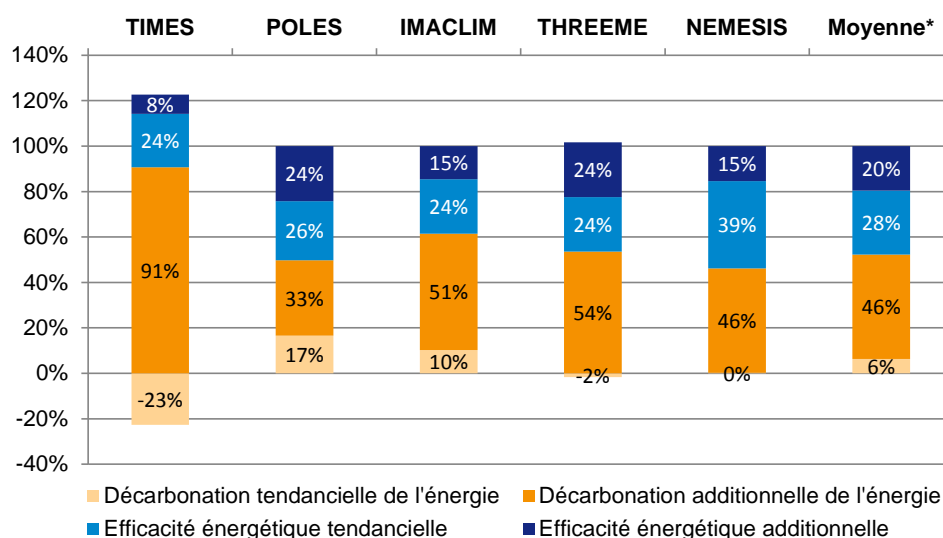
La neutralité carbone du système énergétique est rendue possible par les économies d'énergie autant que par la décarbonation de l'énergie

Les modèles estiment que, pour être efficiente, la baisse des émissions par unité de PIB à l'horizon 2040 par rapport à 2015 devrait être issue (voir figure 35)¹ :

- pour moitié (48 % selon la moyenne des modèles) d'une amélioration de l'efficacité énergétique – dont seulement 20 points appelleraient des mesures additionnelles ;
- et pour l'autre moitié (52 % sur la moyenne des modèles) d'une décarbonation de l'énergie – cette décarbonation étant presque intégralement liée à la politique climatique.

Le premier volet, celui de l'efficacité énergétique, se traduit par des changements d'équipement, de mode de production et de comportements. Le second, celui de la décarbonation de l'énergie, se traduit en pratique par un changement du mix énergétique réduisant la part des fossiles en faveur des énergies renouvelables. Ces deux leviers impliquent l'un et l'autre des investissements importants.

Figure 35 – Part de l'efficacité énergétique et de la décarbonation de l'énergie dans le découplage des émissions au PIB à l'horizon 2040 par rapport à 2015



Lecture : d'après le modèle IMACLIM, la baisse des émissions par unité de PIB à l'horizon 2040 par rapport à 2015 est issue à 61 % d'une décarbonation de l'énergie dont 10 points seraient réalisés hors politique climatique additionnelle, et à 49 % d'une baisse de la consommation d'énergie.

* La demande de services énergétiques étant exogène dans TIMES, la moyenne est calculée sans prendre en compte ce modèle.

Source : calcul des auteurs à partir des résultats de simulation des modèles

¹ Les résultats des modèles sont relativement peu dispersés autour de cette moyenne, à l'exclusion du modèle TIMES pour lequel cependant la demande de services énergétiques est exogène et qui, par conséquent, sous-estime l'importance de l'efficience énergétique.

Des besoins d'investissement importants

Les efforts d'investissement peuvent être considérés à plusieurs niveaux.

- Le premier niveau est celui des **investissements bruts**, qui représentent l'ensemble des investissements réalisés dont l'objet explicite est la décarbonation. La mise en place d'une ferme éolienne, par exemple, participe de cet *investissement brut*. Une grande majorité de cet investissement consiste en réalité en une redirection des investissements existants et seule une partie constitue des investissements additionnels à réaliser. Les exercices de modélisation – dans le cadre de cette commission tout comme dans la plupart des travaux publiés – ne permettent pas directement d'évaluer le niveau des investissements à rediriger et par conséquent de ces investissements bruts. Certains travaux plus approfondis suggèrent que les investissements à rediriger représenteraient environ trois fois le montant des investissements verts. Cette estimation reste néanmoins sujette à beaucoup d'incertitudes¹.
- Le deuxième niveau est celui des **investissements verts nets de ces effets de substitution (hors investissements redirigés)**, dans la mesure où les investissements « propres » sont pour partie réalisés à la place d'investissements « émetteurs de GES ». Dans l'exemple précédent, l'investissement dans une ferme éolienne peut s'effectuer à la place d'une centrale à charbon. *L'investissement net* est donc mesuré, non pas par le coût de la ferme éolienne, mais par la différence de coût entre la ferme éolienne et la centrale à charbon équivalente.

L'investissement net des effets de substitution est le surplus direct d'investissement nécessaire à la décarbonation. Son montant peut être obtenu par les modèles technico-économiques en comparant le montant des investissements réalisés dans le scénario ZEN à ceux réalisés dans le scénario de référence. La figure 36 présente l'ampleur des flux d'investissements obtenus par le modèle TIMES. Le surplus d'investissement dans l'ensemble du système énergétique (production et usage) s'accroît progressivement au fur et à mesure que la contrainte s'accroît, cette croissance étant le reflet d'une trajectoire de réduction d'émissions linéaire et d'un coût d'abattement croissant. Selon ce modèle, la réduction des émissions nécessitera des investissements annuels supplémentaires dans la production et l'usage de l'énergie de plus de 1 point de PIB en 2030 et de l'ordre de 1,5 point en 2040. Cela représenterait un accroissement de l'investissement énergétique de 25 % en 2030 et de 30 % en 2040. Les secteurs y contribuant le plus sont celui des transports, suivi

¹ Dasgupta D., Espagne E., Hourcade J.-C. *et al.* (2016), « [Did the Paris Agreement plant the seeds of a climate consistent international financial regime?](#) », *Note di Lavoro*, n° 50, FEEM.

du bâtiment et de la production d'énergie, en particulier d'électricité. Ces montants d'investissements ne reflètent que les investissements dans le système énergétique (production et usage) ; ils n'incluent pas les investissements nécessaires à la décarbonation de l'agriculture, des procédés industriels et du traitement des déchets. Par ailleurs, le modèle n'intégrant pas de dimension spatiale, il ne prend pas en compte ou sous-évalue certains investissements, en infrastructures notamment. Sachant que les investissements énergétiques ne concernent que les trois quarts des abattements à réaliser et qu'ils peuvent être sous-estimés, une hypothèse très approximative d'homothétie aux autres secteurs conduit à estimer qu'**au total cet investissement pourrait atteindre les 2 points de PIB à l'horizon 2040 : il représenterait alors 10 % de l'investissement total en France, soit environ 60 milliards d'euros par an.** Cet ordre de grandeur est comparable aux évaluations réalisées au niveau international :

- l'OCDE évalue l'investissement mondial nécessaire pour rester sous les 2 °C à 6 900 milliards de dollars par an sur les quinze prochaines années, soit une majoration de 10 % des investissements annuels moyens dans les infrastructures¹ ;
- le *New Climate Economy Report*², s'appuyant sur différents travaux³, évalue le surcroît d'investissement mondial en infrastructure à 5 % pour rendre ce capital faiblement intensif en carbone ;
- plus récemment, le GIEC dans son rapport 1,5 °C estime que d'ici à 2035, 2,5 % du PIB mondial devront être consacrés à l'investissement bas carbone chaque année ;
- et la Commission européenne⁴ évalue jusqu'à 1,2 % du PIB le surcroît d'investissement annuel entre 2030 et 2050 dans la production et l'usage de l'énergie permettant d'atteindre l'objectif de « zéro émissions nettes » au niveau européen (entre 175 et 290 milliards d'euros annuels en moyenne sur la période selon les scénarios). L'investissement monterait progressivement en charge pour atteindre 1 % du PIB en 2035 et un pic à 2 % autour de 2040.

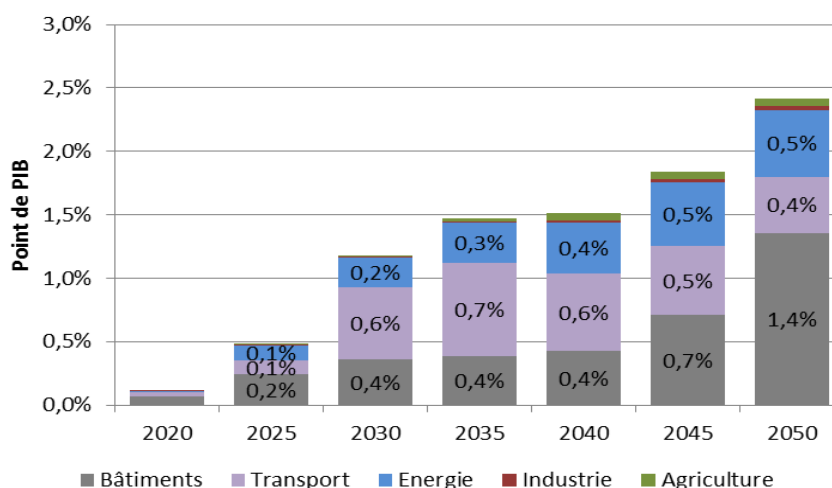
¹ Voir OCDE (2017), *Investing in Climate, Investing in Growth*, et New Climate Economy Project (2018), *Unlocking The Inclusive Growth Story of the 21st Century*.

² New Climate Economy (2016), *The Sustainable Infrastructure Imperative. Financing for better growth and development*.

³ Bhattacharya A. *et al.* (2016), *Delivering on Sustainable Infrastructure for Better Development and Better Climate*, et Global Commission on the Economy and Climate (2014).

⁴ Commission européenne (2018), *A Clean Planet for All. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*.

Figure 36 – Surplus d'investissement dans le système par rapport au scénario de référence

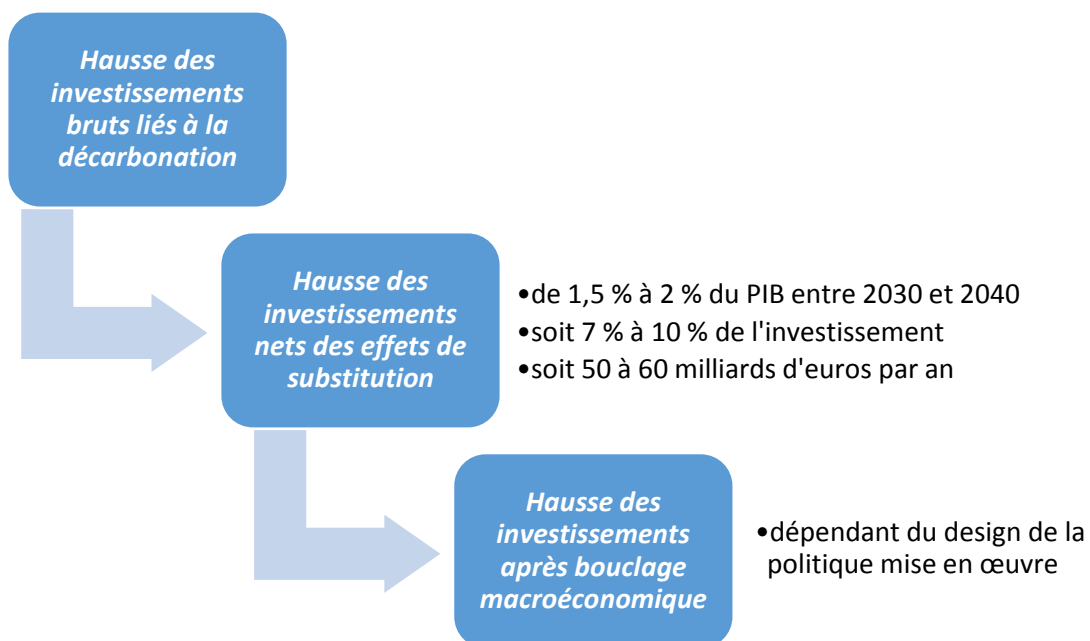


Source : simulation du modèle TIMES (hypothèse de puits UTCF de 85 MtCO₂e)

- Enfin, le troisième niveau est celui de l'**investissement total net des effets de bouclage macroéconomique** (effets d'éviction, relance keynésienne, etc.). Celui-ci intègre, en plus du niveau précédent, deux effets distincts :
 - *l'effet d'éviction* : les investissements supplémentaires (ou plus coûteux) peuvent, en mobilisant des moyens financiers importants, évincer des investissements ailleurs dans l'économie. Lorsqu'un acteur économique – ménage ou entreprise – investit dans une technologie durable, il renonce potentiellement à d'autres dépenses d'investissement. Une fois pris en compte ces effets d'éviction, seule la moitié environ des investissements verts constituerait un réel surcroît d'investissement macroéconomique ;
 - *les effets de levier éventuels de la politique mise en œuvre* : les instruments mobilisés dans le cadre de la politique de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre peuvent, à court terme, générer des effets de relance keynésienne et, à plus long terme, permettre de réduire des imperfections de marché (par la mise en place de législations plus pertinentes, par un recyclage plus efficient des recettes fiscales, etc.). Ces effets de levier peuvent alors conduire à accroître davantage l'investissement macroéconomique. Leur ampleur est entièrement dépendante de la politique mise en œuvre.

Au final, le surplus d'investissement réel au niveau national, résultant de l'ensemble des effets recensés, reste intimement lié au contexte macroéconomique et financier, au design des politiques publiques et à la chronologie des actions.

Figure 37 – Les besoins d'investissements





CHAPITRE 4

LA VALEUR DE L'ACTION POUR LE CLIMAT

Sur la base des résultats des différentes approches utilisées, de leurs avantages comparatifs et de leur complémentarité, la commission propose une trajectoire pluriannuelle de valeurs à l'horizon 2050. Ce chapitre explicite les choix retenus et s'attache à évaluer et à encadrer les incertitudes entourant cette trajectoire. Il présente enfin quelques évaluations macroéconomiques des actions sous-jacentes à la trajectoire proposée.

1. La trajectoire proposée s'ancre sur une valeur de 250 € en 2030

1.1. Une trajectoire unique pour l'ensemble de l'économie

La valeur de l'action pour le climat a vocation à constituer une référence unique pour l'ensemble de l'économie, même si les gisements d'économies et les coûts d'abattement du carbone diffèrent d'un secteur à l'autre. Retenir, *a priori*, des valeurs de « référence » différentes pour concevoir les politiques de décarbonation dans les différents secteurs reviendrait en effet à admettre que l'on est prêt à investir 1 000 € pour obtenir des réductions d'émissions dans un secteur qui pourraient l'être à 250 € ou 100 € dans les secteurs où les coûts d'abattement sont plus faibles, probablement les secteurs fortement émetteurs et disposant de gisements de réduction importants. Une référence unique incite à mobiliser les gisements de décarbonation dont les coûts d'abattement sont et seront inférieurs à la valeur « tutélaire » et à procéder plus généralement par ordre de mérite.

1.2. Une trajectoire pluriannuelle ancrée sur une valeur de 250 €₂₀₁₈/tCO_{2e} en 2030

Le point d'ancrage 2030

La commission considère que l'horizon 2030 a vocation à constituer le point d'ancrage privilégié d'une trajectoire de valeur tutélaire du carbone, pour trois raisons fondamentales :

- l'horizon 2030 (soit un horizon d'un peu plus de dix ans) est décisif pour « ancrer » les anticipations et déclencher un programme public et privé d'investissements « bas carbone » ;
- à cet horizon, les travaux de modélisation peuvent s'adosser à des éléments de prospective économique et technologique raisonnablement solides et fiables, même s'ils restent naturellement entourés d'incertitudes ;
- les actions de décarbonation à engager d'ici 2030 seront utiles à la France, quelle que soit la coopération climatique internationale.

Alors que la valeur du carbone définie par le rapport de 2008 pour l'année 2030 était de 100 €₂₀₀₈/tCO_{2e} (110 €₂₀₁₈/tCO_{2e}), la commission propose de la réviser substantiellement à la hausse, en la fixant à 250 €₂₀₁₈/tCO_{2e}. Cette valeur élevée témoigne de l'ampleur du chemin qui reste à parcourir ; elle traduit le coût des technologies nécessaires pour atteindre l'objectif.

Un rattrapage linéaire d'aujourd'hui à 2030

La commission a choisi de partir de la valeur tutélaire du carbone actuelle (54 €₂₀₁₈/tCO_{2e}, issue du rapport de 2008). Cela ne veut pas dire que cette valeur de départ est un point « optimal ». Elle reflète la stratégie de lissage de réduction des émissions de gaz à effet de serre retenue dans le cahier des charges. Dans ce cadre, les modèles prennent en compte cette réduction progressive des émissions à travers deux dynamiques :

- la dynamique des anticipations, qui conduit les acteurs à déclencher les investissements et actions sur la base des valeurs futures du carbone ;
- la dynamique d'ajustement du capital, qui conduit ces mêmes acteurs à prendre en compte les coûts d'ajustement, et donc à adapter progressivement les stocks d'actifs aux exigences de réduction des émissions.

Partant de ce point initial à 54 €₂₀₁₈/tCO_{2e}, la valeur de l'action pour le climat croît donc fortement pour rejoindre les niveaux cible de 2030 et de 2040.

Une trajectoire de la valeur tutélaire du carbone calée sur les coûts des technologies de décarbonation

La trajectoire pluriannuelle de valeur tutélaire du carbone proposée au-delà de 2030 intègre le résultat de ces différentes approches :

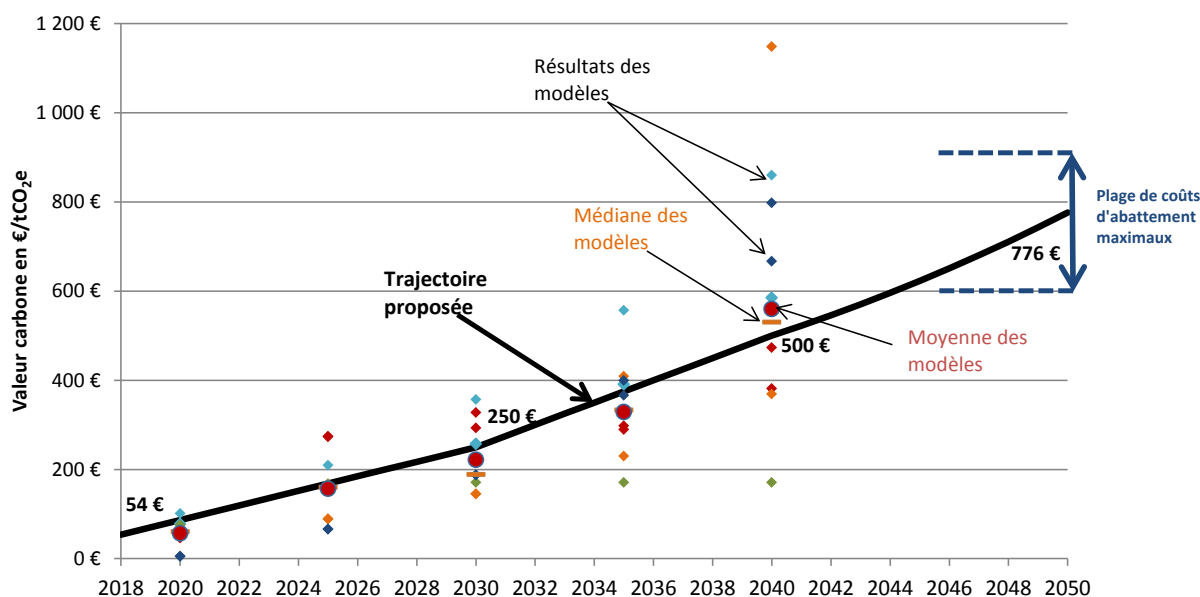
- les simulations de modèles qui restent robustes jusqu'au-delà de 2040, lorsque les niveaux de réduction s'approchent du facteur 4 ;
- une prospective sur les coûts du portefeuille de technologies structurantes pour réussir la décarbonation. La commission ne suppose pas l'arrivée d'une nouvelle technologie de rupture miracle, parfois appelée « *backstop technology*¹ », c'est-à-dire d'une technologie permettant de se passer complètement des énergies fossiles ou d'abattre massivement les émissions de GES pour un coût modéré. Elle considère que le portefeuille de technologies structurantes (recours par exemple à un usage direct plus étendu de l'électricité décarbonée, ou à un usage indirect *via* le vecteur hydrogène produit de façon décarbonée par électrolyse de l'eau²) permettrait de parvenir à une décarbonation complète moyennant des prix de bascule relativement élevés (de l'ordre au plus de 600-900 €/t en 2050) ;
- le calage sur une règle de Hotelling à partir de 2040 pour un taux d'actualisation public de 4,5 %, celle-ci garantissant que la valeur des gains climatiques n'est pas « écrasée » par l'actualisation.

Cette trajectoire aboutit à une valeur de 500 €₂₀₁₈/tCO_{2e} en 2040 et à 775 €₂₀₁₈/tCO_{2e} en 2050.

¹ Une technologie est qualifiée de *backstop* lorsqu'elle bénéficie d'un potentiel quasi illimité en plus d'un faible coût.

² Usage direct ou indirect, *i.e.* par reconstitution à partir d'hydrogène et d'une source de carbone à capter de combustibles carbonés liquides et gazeux (« power to liquid » et « power to gas »).

Figure 38 – Proposition de trajectoire



Source : France Stratégie

2. La trajectoire est revue à la hausse, en ligne avec les travaux internationaux de modélisation les plus récents

2.1. Une revalorisation de la trajectoire trouvant son origine dans l'épuisement du budget carbone mondial et français

La construction de la valeur tutélaire du carbone est réalisée dans un contexte différent de celui de la précédente évaluation, datant de 2008. Plusieurs éléments conduisent en effet à modifier la trajectoire définie il y a dix ans (voir figure 41).

Deux éléments jouent dans le sens d'une forte revalorisation de la valeur tutélaire.

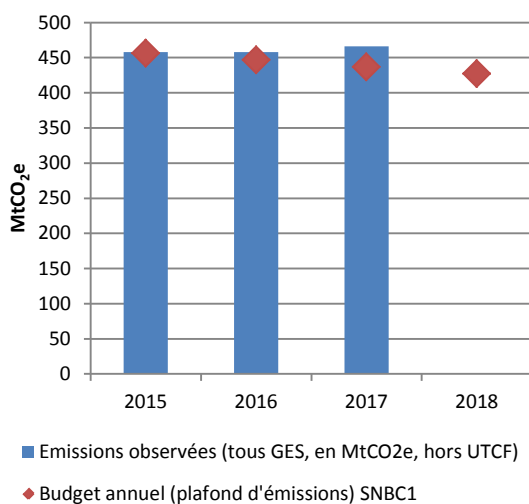
- **L'épuisement du budget carbone :**

- au niveau mondial, le budget carbone disponible s'est réduit depuis dix ans, conséquence du retard pris et d'une lecture plus pessimiste par le GIEC des marges de manœuvre disponibles pour contenir la hausse des températures ;
- au niveau français, nous avons aussi engrangé un retard important dans l'action pour le climat depuis 2008 (voir figure 39) alors même que la crise économique a joué à la baisse sur nos émissions de GES (voir figure 40). Il est donc nécessaire d'engager une période de rattrapage de la valeur tutélaire du carbone entre

aujourd'hui et 2030, afin de rendre possibles et rentables les investissements et les efforts d'innovation nécessaires à la transition ;

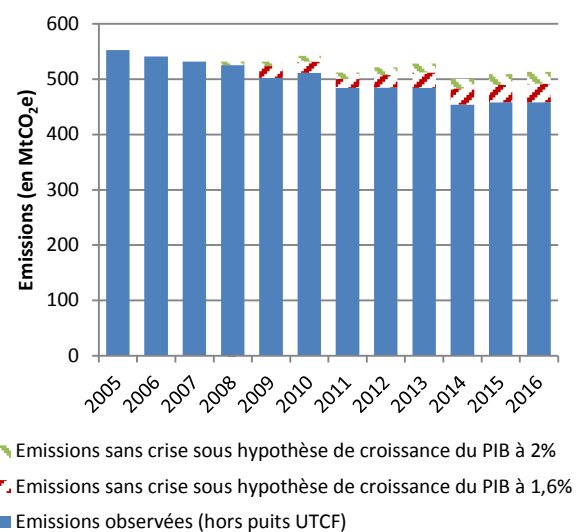
- l'objectif de neutralité carbone « nette » en 2050 adopté récemment par la France est plus ambitieux que l'objectif facteur 4, puisqu'il correspond désormais à un facteur de réduction compris entre 5 et 7 selon les hypothèses de puits retenues.

Figure 39 – Le retard sur les objectifs définis par la SNBC en 2015



Source : SNBC et CITEPA (avec estimation provisoire pour 2017)

Figure 40 – La contribution potentielle de la crise à la réduction des émissions de GES passées



Source : calcul des auteurs à partir de données CITEPA, CCNUCC (2018) et Insee

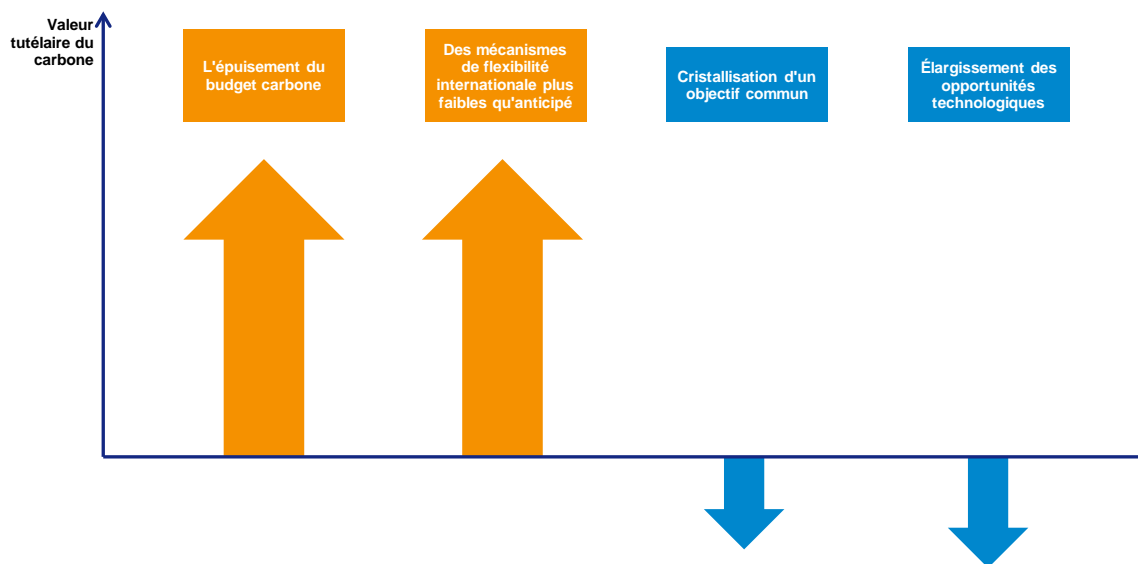
- **Le caractère très limité des mécanismes de flexibilité internationale (prix du carbone, échange de permis).** Contrairement à 2008, la commission a jugé prudent de ne pas intégrer dans la construction de la trajectoire future la possibilité de compenser un surplus d'émissions par des achats de droits à émettre à l'étranger. Les perspectives en matière de flexibilité internationale ne se sont en effet pas concrétisées, ce qui renforce le besoin d'investissement sur le territoire national toutes choses égales par ailleurs.

À l'inverse, d'autres facteurs plus récents jouent, dans une moindre mesure, dans le sens de la modération de la valeur de l'action pour le climat :

- l'Accord de Paris de 2015 qui cristallise un objectif commun ainsi que des engagements nationaux, certes encore insuffisants pour y parvenir ;

- l'élargissement du champ des opportunités technologiques, tel que documenté notamment par l'AIE, dont les effets potentiels se feront sentir en fin de période.

Figure 41 – Ce qui a fait évoluer la valeur tutélaire du carbone



Source : France Stratégie

2.2. Une trajectoire en cohérence avec les travaux internationaux les plus récents

La valeur tutélaire du carbone ici proposée est dans la plage des valeurs du carbone recensées dans le dernier rapport spécial du GIEC d'octobre 2018, plage elle-même sensiblement revue à la hausse pour tenir compte des risques d'épuisement rapide des budgets carbone (voir Chapitre 1). Comme le synthétise le rapport spécial du GIEC d'octobre 2018, les évaluations calées sur un scénario dont la probabilité de dépasser les 2 °C est faible s'inscrivent dans une fourchette de 15 à 1 300 \$₂₀₁₀/tCO_{2e} en 2030, celles calées sur un scénario où le réchauffement serait limité à 1,5 °C avec une probabilité modérée se situent dans une fourchette 40-1 200 \$₂₀₁₀/tCO_{2e} (voir tableau 15). L'étendue de ces plages de valeurs reflète la variété des modélisations, les incertitudes sur le portefeuille présent et futur des technologies de décarbonation, ainsi que les scénarios de référence considérés.

**Tableau 15 – Valeurs carbone issues du rapport spécial 1,5 °C du GIEC
(Valeurs non actualisées en \$₂₀₁₀/tCO₂e)**

Scénario	Descriptif	Ordre de grandeur des plages de valeurs		Valeurs moyennes	
		2030	2050	2030	2050
Below 1.5 °C	Probabilité de dépasser 1,5 °C inférieure à 34 %	130 - 5 500	240 - 13 000	1 472	3 978
1.5 °C low	Probabilité de dépasser 1,5 °C comprise entre 34 % et 50 %	40 - 1 200	120 - 4 000	334	1 026
1.5 °C high	Probabilité de dépasser 1,5 °C comprise entre 50 % et 67 %	15 - 700	100 - 3 300	129	586
Lower 2 °C	Probabilité de dépasser 2 °C inférieure à 34 %	15 - 1 300	70 - 3 500	164	518
Higher 2 °C	Probabilité de dépasser 2 °C comprise entre 34 % et 50 %	15 - 200	45 - 950	56	169

Source : Rapport spécial du GIEC pour les plages de valeurs et calcul des auteurs à partir des données du GIEC (disponible sur le site de l'IIASA) pour les moyennes

3. Une coopération internationale plus intense permettrait de réduire les coûts d'abattement

3.1. Les incertitudes technologiques et comportementales

La trajectoire de référence proposée s'inscrit dans le cadre d'une action mondiale permettant de tenir les engagements de l'Accord de Paris, voire de limiter le réchauffement sous les 2 °C. Dans ce cadre, la trajectoire proposée est encadrée à compter de 2030 par une fourchette croissante dans le temps, reflétant les incertitudes sur le coût des technologies, les puits de carbone et les changements de comportement des acteurs.

La fourchette est dimensionnée par une évaluation des incertitudes présentées au chapitre précédent quant à la taille des puits de carbone et au coût des technologies de décarbonation les plus structurantes identifiées par les travaux de prospective. Elle se fonde également sur la sensibilité des résultats aux hypothèses sur les comportements des acteurs privés (élasticités conservatrices ou augmentées).

- Dans ce cadre, la borne haute de la fourchette correspond à une situation où les inerties de comportement resteraient fortes et le progrès technique incrémental.

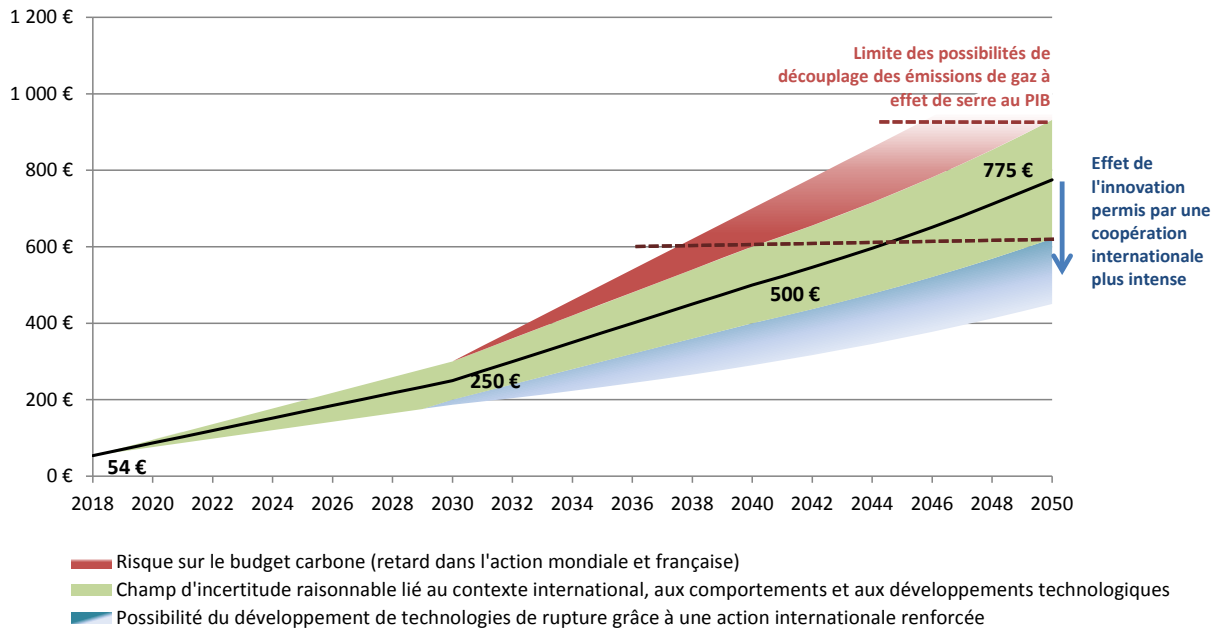
- La borne basse de la fourchette correspondrait à une situation où la décarbonation bénéficierait d'un déploiement plus rapide de nouvelles technologies et de changements de comportements de tous les acteurs, reflétant une prise de conscience sociétale des enjeux de la lutte contre le changement climatique.

3.2. La valeur de l'action internationale

Au-delà de la fourchette centrale, deux zones d'incertitudes peuvent être explicitées pour matérialiser les enjeux de l'intensité de la coopération internationale à l'horizon 2050.

- La première zone d'incertitude, matérialisée par l'aire en bleu sur la figure 42, représente l'incidence d'une action internationale plus ambitieuse à moyen-long terme sur la valeur tutélaire française du carbone. Dans cette zone, le club des pays signataires de l'Accord de Paris s'engagerait plus fortement dans le respect des objectifs de neutralité carbone et favoriserait le développement de technologies de rupture ayant comme caractéristiques un coût d'abattement réduit et un potentiel très large et pérenne (les technologies du type Power to X ou de capture du CO₂ directement dans l'atmosphère pourraient être des candidats). Dans le cas d'un développement et d'un déploiement mondial à grande échelle de ces technologies, le coût d'abattement marginal pourrait être significativement révisé à la baisse. Sur la base d'hypothèses optimistes sur les courbes d'apprentissage, il est estimé que ce coût pourrait descendre jusqu' autour de 450 €/tCO₂e.
- La deuxième zone d'incertitude est matérialisée par l'aire en rouge. Elle est associée au risque d'un retard dans la mobilisation internationale. L'occurrence de ces risques devrait conduire à investir plus tôt dans des technologies coûteuses, d'où une hausse plus rapide de la valeur tutélaire. Au-delà du seuil correspondant au coût d'abattement maximal lié à des solutions technologiques – incertain, mais estimé être dans la plage 600-900 €/tCO₂e –, augmenter davantage la valeur tutélaire du carbone serait sans objet. Cela conduirait à mobiliser dans des délais très courts des solutions technologiques ou des changements de comportement trop coûteux, avec à la clé des pertes possibles de bien-être, de PIB et de compétitivité.

Figure 42 – Les incertitudes entourant la trajectoire de la valeur tutélaire du carbone



Source : France Stratégie

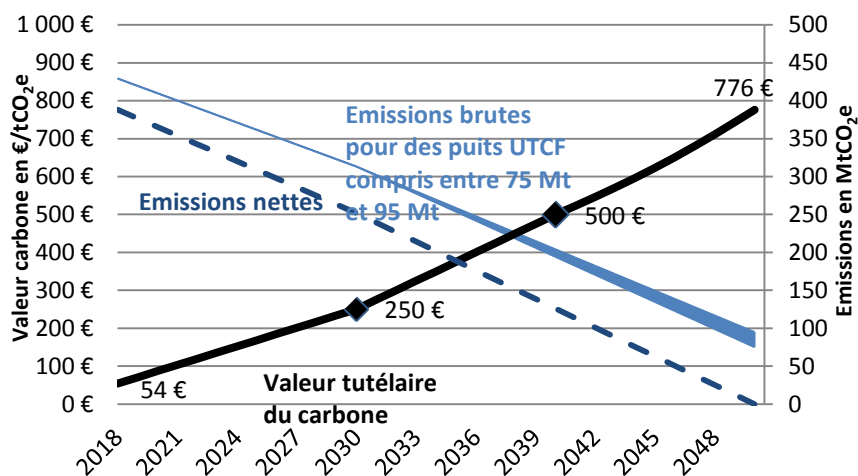
4. La valorisation des actions de décarbonation

La trajectoire de valeur tutélaire du carbone constitue une référence pour donner de la valeur à l'action pour le climat. Cette valorisation a vocation à se décliner au niveau microéconomique pour identifier les projets ou les actions utiles à la lutte contre le changement climatique, ce que les chapitres suivants consacrés aux usages explicitent. Cette partie propose, à titre illustratif, une valorisation macroéconomique des actions de lutte contre le changement climatique potentiellement rentables, des gains socio-économiques associés à ces actions, ainsi que le coût social des émissions résiduelles.

4.1. Le montant des actions de décarbonation rentables

Le couple défini par la trajectoire de réduction des émissions et la trajectoire de valeur tutélaire du carbone (voir figure 43) est le résultat d'une masse critique d'actions de décarbonation.

Figure 43 – Une baisse des émissions concomitante à une augmentation de la valeur carbone



Source : France Stratégie, calculs des auteurs

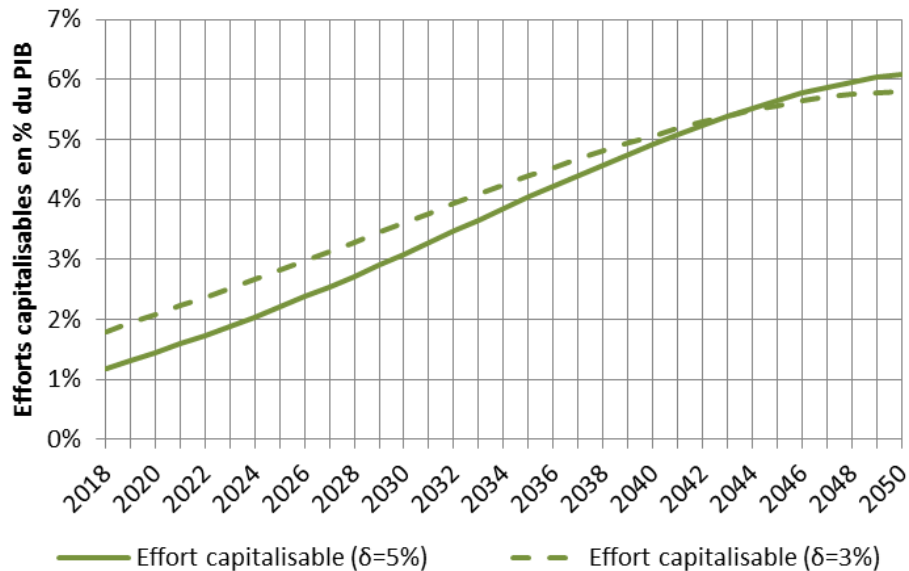
La trajectoire de valeur carbone a pour objectif de donner une valeur socioéconomique aux « actions » visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, de sorte à constituer un « capital vert » permettant la décarbonation de l'économie. Ces actions conduisant à réduire les émissions peuvent être considérées comme capitalisables dans le sens où leurs effets sont durables et augmentent la capacité future à émettre moins de GES. Changer de mode de transport, procéder à la rénovation thermique d'un bâtiment, changer le mix de production énergétique représente un effort initial prenant la forme d'un investissement ou d'un changement de comportement.

Ces actions de décarbonation sont donc assimilables à un investissement économique, même si certaines d'entre elles dépassent le périmètre des seuls investissements physiques mesurés par la comptabilité nationale.

Le montant de ces actions capitalisables pourrait atteindre de l'ordre de 3 % à 3,5 % du PIB en 2030, de 5 % en 2040 et de 6 % du PIB en 2050 (voir figure 43 et encadré 9 pour les calculs). D'après les résultats de simulation présentés dans le chapitre précédent, seule la moitié environ constituerait des dépenses d'investissement au sens de la comptabilité nationale (1,5 % à 2 % de PIB entre 2030 et 2040).

Ces chiffres donnent des ordres de grandeur du montant des actions que la trajectoire de valeur tutélaire proposée devrait rentabiliser de sorte à constituer un « *capital décarboné* » permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Figure 44 – Montant des efforts capitalisables ou coût annuel des efforts à fournir (en pourcentage du PIB, selon le taux de déclassement δ)



Note : le montant des efforts capitalisables est calculé ici sous l'hypothèse que l'ensemble des efforts d'abattement sont réalisés sous forme d'investissement, pris au sens large, dont le taux de déclassement serait compris entre 3 % et 5 %.

Le calcul est basé sur une hypothèse de puits UTCF de 95 MtCO₂e, un taux d'actualisation de 4,5 % et un taux de croissance annuel du PIB de 1,6 %.

Source : France Stratégie, calcul des auteurs

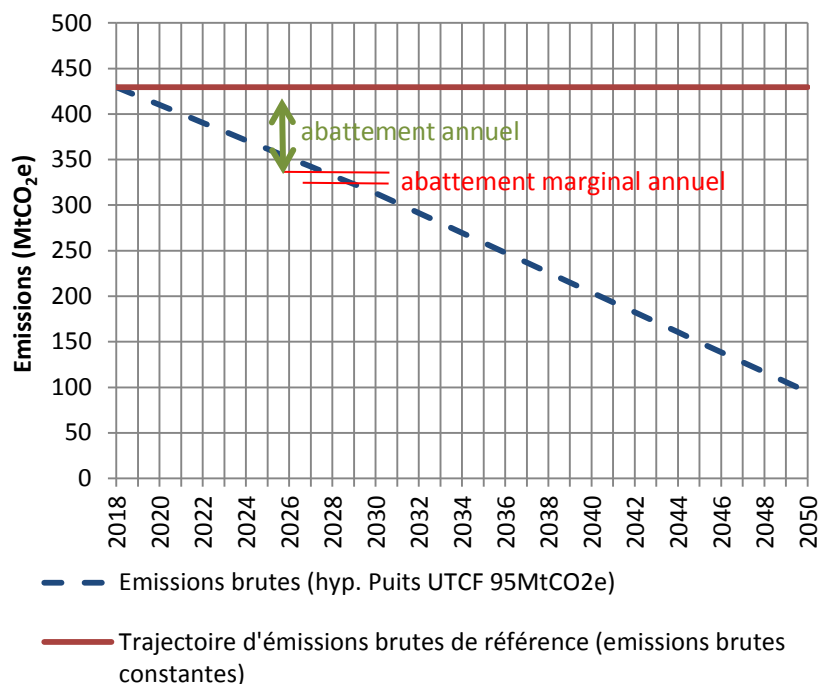
Encadré 9 – Le calcul de la valeur des abattements et du montant des efforts annuels pour y parvenir

Les calculs de la valeur sociale des abattements et du montant des efforts annuels sont réalisés à partir des hypothèses suivantes :

- un flux d'émissions brutes (hors puits) constant dans le scénario de référence (ce qui est relativement cohérent avec les résultats de modèles sur les émissions énergétiques) ;
- une réduction linéaire (avec une légère rupture de pente en 2030) des émissions, c'est-à-dire d'un abattement marginal annuel constant de l'ordre de 10 à 11 Mt de CO₂e par an selon les hypothèses de puits (75 MtCO₂e ou 95 MtCO₂e).

- une valeur tutélaire du carbone croissante telle que décrite par la figure 42 : 250 €₂₀₁₈/tCO₂e en 2030 ; 500 €₂₀₁₈/tCO₂e en 2040 ; 775 €₂₀₁₈/tCO₂e en 2050. Post-2050, la valeur tutélaire est ensuite considérée comme constante¹.

Figure 45 – Les efforts annuels de réduction d'émissions



Source : France Stratégie, calculs des auteurs

On distingue l'*abattement annuel* (ou l'abattement annuel total) décrit par l'écart du niveau d'émissions entre le scénario de référence et le scénario visant la neutralité carbone en 2050 (double flèche verte sur la figure 45) ; et l'*abattement marginal annuel* défini par l'accroissement de l'abattement annuel total (double trait rouge sur la figure 45).

Tandis que l'abattement total annuel est continûment croissant sur la période, l'abattement marginal reste constant puisque la réduction des émissions est linéaire.

Si les abattements sont entièrement réalisés par des efforts capitalisables, ces efforts réalisés à chaque période doivent permettre d'accroître l'abattement des émissions de CO₂e de l'abattement marginal annuel.

¹ Cette hypothèse n'est pas exactement celle retenue dans la partie usage de ce rapport, qui considère que la valeur tutélaire devrait croître à 4,5 % jusqu'en 2060, mais elle est utilisée ici à titre illustratif.

L'investissement en T est supposé dimensionné de sorte à accroître la capacité d'abattement E_t de e par rapport à la période T-1, cette capacité se déclassant de δ à chaque période. Cet investissement doit donc correspondre à une capacité d'abattement de $e + \delta * E_{T-1} = e \times [\delta(T - 1) + 1]$. Le montant maximal d'investissement rentable associé à cette capacité d'abattement est égal au gain défini par la valeur actualisée de ces réductions d'émissions :

$$I_T = \sum_{t=T}^{\infty} \left(\frac{e \times [\delta(T - 1) + 1] \times V_t}{(1 + a)^{t-T}} \times (1 - \delta)^{t-T} \right)$$

$$= e \times [\delta(T - 1) + 1] \times \sum_{t=T}^{\infty} \left[\left(\frac{1 - \delta}{1 + a} \right)^{t-T} \times V_t \right]$$

Les courbes de la figure 44 sont obtenues avec $a = 4,5 \%$ et δ compris entre 3 % et 5 %.

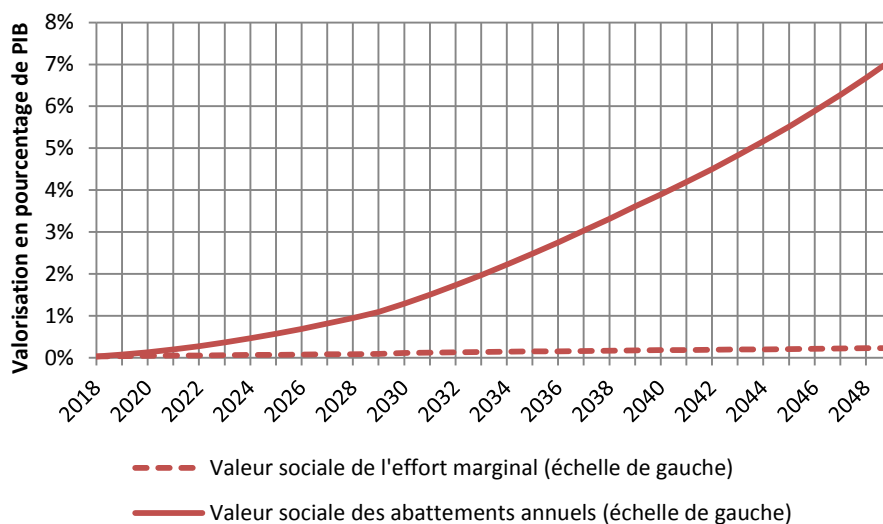
4.2. La valeur des émissions évitées par les actions engagées

La valeur tutélaire du carbone permet d'évaluer la valeur pour la collectivité des actions permettant d'éviter l'émission d'une tonne équivalent CO₂.

La valeur socioéconomique créée par les émissions évitées l'année t peut être mesurée par le montant des émissions éliminées durant l'année t (les abattements annuels représentés sur la figure 45) multiplié par la valeur tutélaire du carbone de cette même année.

Sous les hypothèses de calcul décrites dans l'encadré, cette valeur sociale des émissions évitées l'année t serait équivalente à environ 1 % du PIB en 2030, 3,5 % du PIB en 2040 et 7 % du PIB en 2050 (voir figure 46). Cette valeur croît dans le temps car les émissions terminales sont plus difficiles à abattre, donnant plus de valeur aux actions engagées.

Figure 46 – Valorisation des efforts d’abattement par la trajectoire de valeur tutélaire du carbone (mesurée en pourcentage de PIB)



Source : France Stratégie, calculs des auteurs à partir d'hypothèses décrites dans l'encadré

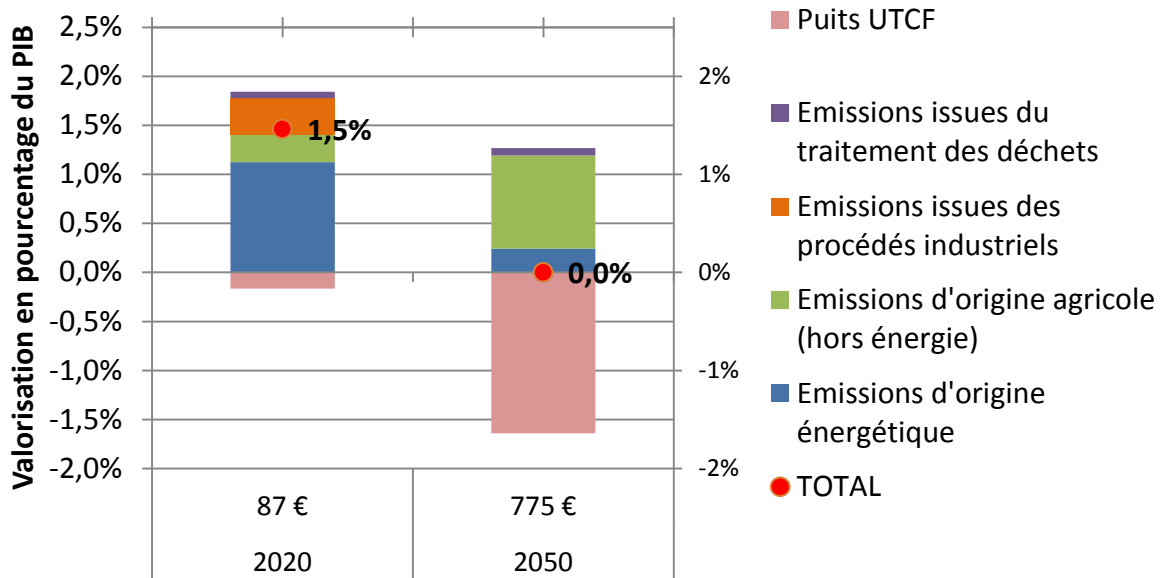
4.3. Le coût socioéconomique des émissions résiduelles de gaz à effet de serre et la valeur des puits

Avec les valeurs de la trajectoire proposée, la valorisation totale des émissions nettes de GES – qui correspond au coût socioéconomique des émissions résiduelles de GES¹ – s’élèverait à 1,5 % du PIB en 2020. Cette évaluation donne une mesure du coût de la non-action en 2020.

Dans le même temps, du fait à la fois de la croissance de la valeur tutélaire du carbone et de l’augmentation de la capacité des puits, la valeur socioéconomique des puits permettant d’absorber les émissions résiduelles difficiles à abattre s’accroît continûment sur la période. Elle s’établit autour de 0,5 point de PIB en 2030 ; à 1,1 point de PIB en 2040 et à 1,6 point de PIB en 2050 (voir figure 47 et tableau 16).

¹ Nous partons du principe que les budgets carbone ont été définis de façon cohérente avec une approche coûts-bénéfices et, par conséquent, que l’approche coûts-efficacité utilisée ici permet bien de déduire un coût social des émissions.

**Figure 47 – Valorisation des puits par la trajectoire proposée
(en pourcentage du PIB)**



Source : France Stratégie, calculs des auteurs

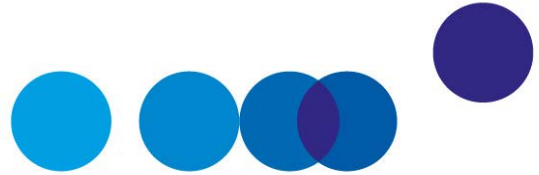
**Tableau 16 – Coût des émissions résiduelles et valorisation des puits
(en pourcentage du PIB)**

	2020	2050
Valeur tutélaire du carbone	87 €	775 €
Émissions d'origine énergétique	1,1 %	0,2 %
Émissions d'origine agricole (hors énergie)	0,3 %	1,0 %
Émissions issues des procédés industriels	0,2 %	0,4 %
Émissions issues du traitement des déchets	0,1 %	0,1 %
Puits UTCF	- 0,2 %	- 1,6 %
Total	1,5 %	0,0 %

Valeur des émissions = Valeur carbone (€/tCO₂e) * niveau des émissions (tCO₂e)/PIBx100.

Source : France Stratégie, calculs des auteurs à partir de la trajectoire de valeur tutélaire du carbone, la trajectoire de réduction des émissions et des projections de PIB¹

¹ Projections du rapport 2015 du Ageing Working Group de la Commission européenne. Projections sur lesquelles les modèles sont basés.



CHAPITRE 5

UN RÉFÉRENTIEL POUR VALORISER LES IMPACTS CLIMATIQUES DES PROJETS D'INVESTISSEMENT PUBLICS

Il existe en France une longue tradition de calcul économique public pour évaluer l'ensemble des incidences sur le bien-être qu'est susceptible d'apporter un projet d'investissement public. Ce calcul économique se distingue des calculs financiers habituels sur trois points essentiels : il adopte la conception la plus large possible des gains d'un projet pour la collectivité (vies sauvées, temps gagné, pollution évitée) ; il mesure ces gains – et les coûts – sur un horizon de long terme ; il les actualise à un taux plus faible que celui d'un investisseur privé, reflétant la capacité de l'État à porter et à diluer les risques.

Le cadre de l'analyse socioéconomique s'est enrichi depuis une dizaine d'années pour mieux prendre en compte les enjeux environnementaux, et tout particulièrement les enjeux climatiques des projets :

- la contribution des projets d'investissement à la lutte contre le changement climatique a été mieux explicitée avec la formalisation en 2008 d'une trajectoire de valeur tutélaire du carbone ;
- l'horizon d'évaluation des projets a été allongé pour mieux prendre en compte leurs effets structurants de long terme, voire de très long terme ;
- l'indexation de la valeur tutélaire du carbone sur le taux d'actualisation public, en application de la règle de Hotelling, a conduit à soutenir la valorisation du carbone à des horizons éloignés, à éviter que celle-ci soit écrasée par la valeur du temps.

La nouvelle trajectoire de valeur tutélaire du carbone proposée dans ce rapport doit être l'occasion de franchir un nouveau cap.

L'investissement public tous projets confondus représentait 76 milliards d'euros en France en 2016, soit 3,4 % du PIB, réalisé en majorité par les collectivités territoriales. Les projets d'investissement publics nationaux et locaux ont vocation à apporter une contribution importante à la réalisation des objectifs de décarbonation, que ce soit pour optimiser les émissions liées aux consommations d'énergie (rénovation thermique d'un patrimoine immobilier très important parfois vétuste, etc.), pour faciliter le déploiement des énergies renouvelables dans les villes (réseaux de chaleur, réseaux de bornes de recharge pour les véhicules électriques¹) ou pour décarboner la mobilité (infrastructures de transport, susceptibles de favoriser les reports modaux). Certains investissements publics peuvent être un préalable à la mise en œuvre de solutions de décarbonation par les acteurs privés (passage d'un chauffage au gaz à un chauffage à la biomasse via un réseau de chaleur, passage au véhicule électrique ou à des transports en commun). Or, force est de constater qu'une majorité de projets d'investissements public « échappent » encore à des processus d'évaluation transparents et contradictoires. Étendre le champ de l'évaluation, c'est se donner les moyens de mieux hiérarchiser les projets et de cibler l'argent public qui est rare sur les projets les plus pertinents.

La révision de la valeur tutélaire du carbone, elle-même liée à la révision des objectifs, appelle à rénover l'ensemble du système d'évaluation : de nouveaux scénarios de référence tenant compte de l'objectif de décarbonation, de nouvelles valeurs du carbone, un nouveau taux d'actualisation, une prise en compte des émissions de gaz à effet de serre tout au long de la vie des projets, de la construction jusqu'à leur fin de vie, même si celle-ci dépasse l'horizon 2050.

1. L'évaluation socioéconomique des projets doit être étendue et renforcée

1.1. Toutes les personnes publiques sont concernées

Aujourd'hui, tous les projets d'investissement civils financés par l'État, ses établissements publics, les établissements publics de santé ou les structures de coopération sanitaire doivent faire l'objet d'une évaluation socioéconomique préalable. En outre, ceux pour lesquels la contribution des acteurs publics dépasse 100 millions d'euros et représente plus de 5 % de la valeur hors taxe du projet font l'objet d'une contre-expertise indépendante pilotée par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) (voir encadré 10).

¹ Même si le déploiement de ces réseaux ne doit pas nécessairement être pris en charge par la puissance publique et peut également relever d'acteurs privés.

Les projets portés par les collectivités territoriales, pour leur part, ne sont pas obligatoirement soumis à évaluation socioéconomique et ne font pas l'objet d'une contre-expertise. Étendre le champ de l'analyse socioéconomique aux grands projets des collectivités territoriales, dans le respect du principe de libre administration, permettrait de gagner en transparence et en cohérence sur la contribution des projets locaux à l'atteinte de l'objectif de décarbonation nationale. Les collectivités territoriales ont de fait un rôle fondamental à jouer dans la réduction des émissions de GES, notamment en structurant les réseaux locaux de transport et de chaleur.

Encadré 10 – Obligations actuelles concernant les évaluations socioéconomiques et aspects méthodologiques

Aujourd'hui, tous les projets d'investissement civils financés par l'État, ses établissements publics, les établissements publics de santé ou les structures de coopération sanitaire doivent faire l'objet d'une évaluation socioéconomique préalable (article 17 de la loi de programmation des finances publiques du 31 décembre 2012). Le décret 2013-1211 du 23 décembre 2013 précise que :

- si la contribution des projets publics mentionnés *supra* dépasse un seuil de 20 M€ HT, le projet doit être déclaré à l'inventaire et le dossier d'évaluation socioéconomique doit contenir certains éléments spécifiques ;
- si la contribution des acteurs publics mentionnés *supra* dépasse un seuil de 100 M€ et représente au moins 5 % du montant total hors taxe du projet d'investissement, cette évaluation socioéconomique est soumise à une contre-expertise indépendante pilotée par le Secrétariat général pour l'investissement.

Les évaluations et contre-expertises doivent être transmises au Parlement.

La méthodologie générale pour réaliser les évaluations socioéconomiques est présentée dans le rapport de 2017 du groupe d'experts sur l'évaluation socioéconomique présidé par Roger Guesnerie¹, qui s'appuie notamment sur le rapport du groupe présidé par Émile Quinet de 2013². Le rapport de 2017 présente en particulier la formule de la valeur actualisée nette (VAN) socioéconomique d'un investissement.

¹ France Stratégie (2017), *Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics*, rédigé sous l'autorité du comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics présidé par Robert Guesnerie.

² Commissariat général à la stratégie et à la prospective (2013), *Évaluation socioéconomique des investissements publics*, rapport de la mission présidée par Émile Quinet.

De manière simplifiée¹ et en isolant la composante « émissions de gaz à effet de serre », celle-ci s'écrit :

$$VAN = \sum_i \frac{\Delta \text{gains marchands}_i - \Delta \text{coûts marchands}_i}{(1+a)^i} + \sum_i \frac{\Delta \text{gains non marchands}_i - \Delta \text{coûts non marchands}_i}{(1+a)^i} + \sum_i \frac{\Delta \text{émissions}_i * VT_i}{(1+a)^i}$$

Avec :

- $\Delta \text{émissions}_i - \Delta \text{coûts marchands}$ l'écart de coûts marchands, comparé à l'option de référence ;
- $\Delta \text{émissions}$ les moindres émissions de gaz à effet de serre l'année i , en différentiel à l'option de référence ;
- VT_i la valeur tutélaire du carbone l'année i ;
- a le taux d'actualisation public retenu pour les évaluations socioéconomiques ;
- les sommes portent sur les années de construction et de fonctionnement ;
- les gains et coûts non marchands ne comprennent pas la valorisation des émissions de gaz à effet de serre ;
- les gains et coûts marchands et non marchands sont en écart à l'option de référence.

Cette formule s'écarte d'une évaluation financière classique car elle se place du point de vue de la collectivité dans son ensemble et non d'un acteur spécifique, elle tient compte des externalités et se fonde sur le taux d'actualisation socioéconomique et non sur un taux d'actualisation privé.

En outre, certains aspects techniques sectoriels sont précisés dans des textes complémentaires (notamment les fiches outils de la Direction générale des transports, des infrastructures et de la mer – DGITM – concernant les infrastructures de transport) ou ont vocation à l'être progressivement à la suite de la publication du rapport de 2017.

¹ En particulier, sans tenir compte de la valeur résiduelle de l'investissement et en supposant que l'année d'actualisation est l'année de début des travaux. Les dépenses publiques tiennent compte du coût d'opportunité des fonds publics (COFP).

1.2. Tous les domaines de l'action publique sont concernés

La sphère traditionnelle d'application du calcul socioéconomique est le domaine des transports, qui concentre de nombreux projets publics et mobilise des enveloppes financières importantes. Depuis quelques années, comme l'illustre le tableau ci-dessous, le calcul socioéconomique s'étend progressivement à d'autres champs, notamment les grands bâtiments publics (universités) et certaines autres infrastructures (réseaux de chaleur). Ces évolutions récentes doivent être confortées.

Tableau 17 – Nombre de contre-expertises réalisées par le SGPI, montant médian des projets concernés

Projets contre-expertisés	2013	2014	2015	2016	2017	2018 T2	Cumul	Montant médian (M€)
Hôpitaux	5	2	7	2	2	2	20	193
Transports	1	2	5	4	3	0	15	1 700
Enseignement supérieur et recherche	0	8	2	0	0	0	10	178
Autres	0	1	2	3	4	0	10	311
Total	6	13	16	9	9	2	55	288

Source : Secrétariat général pour l'investissement (SGPI)

L'un des mérites attendus de l'extension du champ des évaluations socioéconomiques, et tout particulièrement des impacts carbone, est de permettre de mieux hiérarchiser les projets publics entre eux, pour privilégier ceux dont les vertus climatiques sont les mieux affirmées. De fait, on constate, sur la base des évaluations déjà disponibles, que le gain en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre rapporté au coût du projet est très discriminant. Ainsi, ces gains sont particulièrement élevés pour certains projets de transports ferroviaires et collectifs ou de recherche. À l'inverse, et sans surprise, la prise en compte des émissions de GES réduit la valeur des projets autoroutiers présentés ci-dessous (voir tableau 18).

Tableau 18 – Poids du carbone dans l'évaluation de grands projets d'investissement publics

Secteur	Investissement	Coût	VAN ¹	dont impact carbone sur la base de la trajectoire de valeur tutélaire de 2009	Carbone/Coût
		(M€ ₂₀₁₅)	(M€ ₂₀₁₅)	(M€ ₂₀₁₅)	%
Énergie	Réseau de chaleur et de froid avec géothermie sur le plateau de Saclay	47	23	7	15 %
Ferroviaire	Modernisation de la ligne Serqueux-Gisors	344	786	472	137 %
GPE	Grand Paris Express, programme	21 815	28 449	6 825	31 %
Recherche	Microcarb (équipement de mesures des émissions de CO ₂ à partir d'un satellite)	142	31	105	74 %
Autoroute	Contournement est de Rouen	841	787	-78	-9 %
Ferroviaire	Charles de Gaulle Express	1 714	3 056	76	4 %
Autoroute	Liaison autoroutière Castres-Toulouse	275	559	-52	-19 %
Bâtiment	Reconstruction du centre pénitentiaire de Bordeaux-Gradignan	107	21	1	1 %
Ferroviaire	HPGVSE – modernisation de la ligne Paris-Lyon	350	2 156	396	113 %

Source : Secrétariat général pour l'investissement (SGPI)²

La trajectoire de valeur tutélaire du carbone proposée dans ce rapport, fortement revue à la hausse, devrait accentuer cette hiérarchisation des projets : sous l'hypothèse forte d'un scénario de référence inchangé, la discrimination serait plus forte entre projets émetteurs et non émetteurs de gaz à effet de serre, comme l'illustre de manière purement indicative le tableau ci-dessous. L'évolution ne serait pas homothétique pour tous les projets dans la mesure où la chronologie des émissions évitées ou générées joue un rôle important dans le calcul.

¹ Y compris le coût d'opportunité des fonds publics, représentant le coût d'opportunité qu'il y a à mobiliser l'argent public sur un projet spécifique. Voir Commissariat général à la stratégie et à la prospective (2013), *Évaluation socioéconomique des investissements publics*, rapport de la mission présidée par Emile Quinet.

² Rapports en ligne sur le site du SGPI : www.gouvernement.fr/Rapports_CE.

Tableau 19 – Composante de la VAN liée à la prise en compte des émissions de gaz à effet de serre dans l'évaluation de grands projets d'investissement publics (à scénario de référence inchangé)

Investissement	Avec la trajectoire de valeur tutélaire en vigueur	Avec la trajectoire de valeur tutélaire proposée *
	(M€ ₂₀₁₅)	(M€ ₂₀₁₅)
Réseau de chaleur et de froid avec géothermie sur le plateau de Saclay	7	14
Modernisation de la ligne Serqueux-Gisors	472	856
Grand Paris Express, programme	6 825	12 599
Microcarb (équipement de mesures des émissions de CO ₂ à partir d'un satellite)	105	296
Contournement est de Rouen	- 78	- 345
Charles de Gaulle Express	76	75
Liaison autoroutière Castres-Toulouse	- 52	- 241
Reconstruction du centre pénitentiaire de Bordeaux-Gradignan	1	2
HPGVSE – modernisation de la ligne Paris-Lyon	396	361

* Sans modifier le scénario de référence, à titre illustratif.

Source : calculs Secrétariat général pour l'investissement (SGPI)

2. L'ensemble du cadre d'évaluation doit être rénové à l'aune de l'objectif de neutralité carbone

La valeur tutélaire du carbone actuellement utilisée dans les évaluations socioéconomiques est celle issue du rapport de 2009¹, complété par le rapport France Stratégie de 2013 sur l'évaluation socioéconomique². Pour mettre en cohérence les décisions d'investissements publics avec le nouvel objectif de neutralité carbone, nous proposons de mettre à jour cette trajectoire sur la base des propositions du présent rapport.

Cette révision à la hausse de la trajectoire de valeur tutélaire du carbone doit s'accompagner d'une mise à jour de la méthodologie d'évaluation de la valeur des

¹ Centre d'analyse stratégique (2009), *La valeur tutélaire du carbone*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet.

² France Stratégie (2017), *Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics*, op. cit.

projets d'émissions, autour de trois questions : le choix du scénario de référence et la prise en compte du risque, la valeur du carbone au-delà de 2050 et la prise en compte des émissions générées en phase de construction.

2.1. La valorisation de la contribution des projets à la décarbonation de l'économie doit intégrer une analyse des risques

Pour évaluer la contribution d'un projet à la décarbonation de l'économie, il faut tenir compte de trois éléments :

- la situation de référence dans laquelle s'inscrit le projet, et les incertitudes qui l'entourent ;
- la flexibilité qu'apporte le projet pour s'adapter à une évolution de la situation de référence ;
- la corrélation entre les gains apportés par le projet et la croissance économique.

Situation de référence et incertitude associée

Le calcul socioéconomique n'évalue pas la valeur absolue d'un projet mais sa contribution au bien-être collectif par rapport à une situation dans laquelle ce projet n'aurait pas été entrepris. Cela suppose de disposer, secteur par secteur, d'un scénario de référence décrivant l'évolution des grands paramètres dans le secteur considéré (tendances économiques, technologiques et sociales), et d'une option de référence, c'est-à-dire d'une description des alternatives en l'absence de projet. Le gain d'un projet dépend donc fortement des hypothèses retenues pour décrire cette situation sans projet.

Dans les pratiques socioéconomiques en vigueur, le scénario et l'option de référence ne sont pas construits « au fil de l'eau » : ce sont des scénarios de convergence vers l'objectif officiel de décarbonation, sous l'hypothèse d'un alignement des politiques publiques vers cet objectif.

Encadré 11 – La décarbonation inscrite dans le scénario de référence : exemple d'un projet ferroviaire

On peut illustrer l'importance de la construction du scénario de référence avec l'exemple d'un projet ferroviaire pour lequel on cherche à valoriser les gains carbone. Ces gains sont essentiellement dus à un report modal : l'évaluation valorise les émissions qui ne seront pas émises par les usagers qui abandonneront la route ou l'avion pour le train. Mais d'aujourd'hui à 2050, quel parc automobile considère-t-on pour faire ces calculs ? Si le parc automobile

n'a pas été décarboné, le projet apporte un gain carbone important via le report modal. Si en revanche le parc automobile devient totalement électrifié, il n'y aura en fin de période aucune tonne de carbone à valoriser, et ce quelle que soit la valeur tutélaire du carbone à cette même date (en supposant l'électricité elle-même totalement décarbonée). Les avantages du projet ferroviaire en matière de réduction des effets de serre au titre du report modal de la voiture vers le train deviennent donc nuls au-delà de 2050¹. Seul subsiste le gain lié au report de l'aérien vers le train. Le rehaussement de la valeur carbone à long terme n'implique donc pas mécaniquement une augmentation de la valorisation des gains carbone d'un projet, notamment pour les horizons lointains. Tout dépend du scénario de référence considéré, ainsi que de la manière dont on valorise le risque que l'objectif de décarbonation ne soit pas atteint.

Comme le choix du scénario de référence revêt une importance cruciale dans le contexte d'une ambition de décarbonation totale des activités humaines en 2050, l'analyse de la contribution d'un projet à la décarbonation doit prendre en compte les incertitudes associées à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. En effet, la neutralité carbone est un objectif ambitieux et non un résultat acquis d'avance. Lorsqu'on évalue un projet dans un environnement de référence décarboné, il est prudent de tenir compte du risque que la décarbonation soit plus lente qu'anticipé², ce qui rétroagit sur l'intérêt du projet.

La commission ne formule pas à ce stade de recommandation précise sur la manière de prendre en compte cette incertitude et renvoie au groupe d'experts sur la socioéconomie de France Stratégie le soin de préciser le bon cadre de référence de l'analyse des projets. Elle considère que ce travail d'expertise doit prendre en compte trois exigences.

- Les scénarios de référence doivent intégrer le nouvel objectif de neutralité carbone et le fait que les politiques publiques favoriseront la décarbonation, celle-ci n'ayant pas vocation à reposer exclusivement sur des projets d'investissement publics. À ce titre, le groupe d'experts pourra s'appuyer sur les scénarios sectoriels de la SNBC.

¹ Cela ne signifie pas que la valeur du carbone est nulle à cet horizon : si au lieu d'examiner un projet ferroviaire on examine un projet de centrale à charbon, il est important que la valeur du carbone en 2050 ne soit pas nulle pour décourager l'investissement dans la centrale à charbon.

² Cela peut se produire même dans le cas où la valeur carbone calculée pour atteindre cet objectif est internalisée dans l'ensemble des politiques publiques, si la valeur tutélaire calculée initialement est trop faible.

- La valeur « assurantielle » de certains projets structurants doit être monétarisée. Tout l'enjeu est d'éviter que des projets utiles à la décarbonation ne se fassent pas au seul motif que l'on tiendrait pour acquis la convergence vers la neutralité carbone. Cette question est particulièrement prégnante pour les projets dont la contribution à la décarbonation ne peut être considérée comme marginale (grand projet d'urbanisme, de réseau de transport) et qui permettent d'offrir aux acteurs publics et privés des usages alternatifs à ceux reposant sur les énergies carbonées.
- Une déclinaison cohérente par secteur de l'objectif de décarbonation doit être réalisée, ce qui suppose que les scénarios de référence par grand secteur soient :
 - adoptés en concertation avec tous les acteurs publics concernés, sous l'égide d'une coordination assurée par France Stratégie ;
 - explicités précisément dans des documents de référence publics et utilisables par les maîtres d'ouvrage ;
 - révisés régulièrement pour intégrer des informations nouvelles, relatives notamment aux évolutions des comportements et à l'offre technologique ;
 - pris en compte par le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) dans son rôle d'investisseur ou de coordinateur des investissements publics.

Les questions posées par l'évaluation des projets et leur confrontation à un scénario de référence soulèvent de manière plus générale le sujet de la prise en compte du risque dans la valeur des projets. Nous recommandons que le rapport de France Stratégie préparé sous la présidence de Christian Gollier¹ fasse l'objet de deux types d'approfondissement : la prise en compte de la valeur d'option des projets et le taux auquel les bénéfices et les coûts des projets de lutte contre le changement climatique doivent être actualisés.

Mieux intégrer la valeur d'option d'un projet pour tenir compte de l'irréversibilité de certaines décisions²

La lutte contre le changement climatique appelle des actions précoces pour prévenir le risque de dommages graves et irréversibles. Il est également pertinent, s'agissant de projets à durée de vie potentiellement très longue, de garder une certaine flexibilité. Il y a en effet un risque à qualifier d'« indispensables » les solutions déjà connues, de les

¹ Centre d'analyse stratégique (2011), *Le calcul du risque dans les investissements publics*, rapport de la mission présidée par Christian Gollier.

² Bureau D. et Gollier C. (2009), « *Évaluation des projets publics et développement durable* », CEDD, *Références économiques pour le développement durable*, n° 8.

déployer massivement sur les bases d'analyses socioéconomiques trop court-termistes ou mécaniques et de décourager l'innovation qui permettrait de faire émerger des solutions potentiellement plus efficaces, créant ainsi un verrouillage technologique. Cette flexibilité peut prendre deux formes :

- favoriser la réalisation précoce de projets dont l'utilisation est flexible. Par exemple, un réseau de chaleur peut être alimenté par diverses sources de chaleur : il n'est donc pas nécessaire de savoir quelle source de chaleur renouvelable sera privilégiée dans le futur pour être certain de l'intérêt de ce type d'infrastructures ;
- séquencer dans le temps certaines décisions pour mieux tenir compte des nouvelles informations. Par exemple, avant de déployer massivement un réseau de transport donné (autoroute électrique, réseau de bornes de recharge spécifique à un type de véhicules, etc.), il peut être utile de vérifier qu'aucune technologie alternative ne permettrait d'obtenir des résultats similaires avec une meilleure efficacité.

Poursuivre le travail pour mieux intégrer les risques dans la définition de la valeur tutélaire du carbone

Le taux d'actualisation utilisé pour évaluer les projets et, plus généralement, les politiques publiques ayant des conséquences à long terme dépend de différents paramètres (préférence pure pour le présent, croissance anticipée du PIB par tête, gain de bien-être marginal lié à une hausse de la consommation, effet de précaution). Au-delà, le taux d'actualisation doit être affiné pour prendre en compte les risques systémiques dont l'État ne peut se prémunir et pour lesquels il n'y a pas de mutualisation possible, à commencer par le risque macroéconomique.

Comme l'explique le complément au rapport de Christian Gollier¹, cette question de la corrélation au risque macroéconomique est particulièrement importante dans la détermination du taux d'actualisation applicable aux projets dédiés à la lutte contre le changement climatique. En pratique, ce taux peut être majoré ou minoré selon la nature des incertitudes :

- si l'incertitude principale sur la croissance porte sur le rythme du progrès technique permettant de décarboner, il y a un risque qu'une forte croissance engendre beaucoup d'émissions. Le bénéfice marginal d'un projet de lutte contre le changement climatique sera alors positivement corrélé au PIB (« beta climatique » positif) ;
- si l'incertitude principale sur la croissance porte sur l'ampleur des dommages causés par le changement climatique, alors les projets qui luttent contre ce dérèglement

¹ Voir Complément 3, « On the efficient growth rate of carbon price under a carbon budget ».

viennent soutenir la croissance économique. Un bêta climatique négatif aura pour effet de réduire le taux d'actualisation et mènera à valoriser davantage les investissements permettant de réduire les émissions de GES.

Mieux évaluer cette corrélation entre risque climatique et risque macroéconomique, comme le propose le complément au rapport de Christian Gollier, conditionne à la fois une bonne compréhension des risques et le choix du taux d'actualisation applicable aux projets de long terme.

2.2. Les incidences de long terme des projets de lutte contre le changement climatique

L'évaluation socioéconomique s'est enrichie au cours des années récentes pour améliorer la prise en compte du long terme : les taux d'actualisation ont été revus à la baisse ; l'horizon d'évaluation s'est allongé ; dans le domaine de la lutte contre le changement climatique, la règle de Hotelling apporte la garantie que les bénéfices de long terme ne sont pas « écrasés » par l'actualisation.

Dans ce cadre, et même si notre proposition de trajectoire est calée sur l'horizon 2050, il est nécessaire, pour les besoins de l'évaluation des projets dont la durée de vie dépasse cet horizon, de caler une « règle du jeu » post-2050. Même dans un environnement qui serait décarboné, donner une valeur au carbone restera une exigence pour rendre durable le découplage entre PIB et émissions et valoriser les émissions négatives.

Dans ce contexte, nous recommandons de prolonger au-delà de 2050, pour une décennie, la règle de Hotelling, soit une croissance de la valeur tutélaire maintenue à 4,5 % par an. À cet horizon, le stock de capital décarboné aura été constitué et amorti. Au-delà, une modélisation ajustant le cadre de Hotelling pour tenir compte de la constitution d'un capital décarboné¹ montre qu'il suffit de stabiliser la valeur tutélaire du carbone pour préserver les incitations à le renouveler dans la durée.

¹ Voir les Compléments au rapport, Complément 1, « Un modèle avec capital d'abattement pour l'évaluation du carbone », par Boris Le Hir, Aude Pommeret et Mathilde Salin. La stabilisation de la valeur tutélaire est obtenue dans le cas où (i) il n'y a pas de progrès technique faisant diminuer le coût des technologies nécessaires pour atteindre la décarbonation en 2050, (ii) le coût du capital d'abattement n'augmente pas avec la croissance économique et (iii) les puits de carbone sont stables (si les puits de carbone se réduisent après 2050, le maintien de la neutralité carbone nette impliquera d'aller plus loin sur la réduction des émissions brutes, ce qui peut nécessiter de mobiliser des technologies plus coûteuses que celles utilisées pour atteindre initialement la neutralité carbone en 2050, et donc la valeur tutélaire pourrait devoir continuer à croître).

2.3. La prise en compte de l'ensemble de la vie des projets

Il est pertinent de prendre en compte les émissions générées et/ou évitées tout au long de la vie des projets, dès la phase de construction et le cas échéant jusqu'à la phase de démantèlement.

L'évaluation carbone se concentre aujourd'hui sur les émissions évitées ou générées à la mise en service de l'investissement, mais n'inclut pas les émissions de carbone induites par la réalisation des travaux d'infrastructure. Ceux-ci peuvent être importants et participent à l'épuisement du budget carbone de la France. Par exemple, les projets de transports souterrains induisent d'importantes émissions lors du creusement des tunnels, qui sont aujourd'hui rarement prises en compte dans les évaluations socioéconomiques.

La commission recommande que les bilans socioéconomiques intègrent les impacts associés aux travaux d'investissement. Sans entrer dans une analyse en cycle de vie complète, il est utile pour évaluer la rentabilité carbone des projets de vérifier que les émissions émises en phase de construction soient gagées par les baisses d'émission attendues à la mise en service.

Conclusion

L'évaluation socioéconomique fournit un cadre d'analyse indispensable pour apprécier la contribution des projets au bien-être et à lutte contre le changement climatique. Utiliser la valeur tutélaire du carbone, c'est disposer d'une base objective pour orienter les choix d'investissements publics vers l'objectif ZEN. Bien sûr, ce cadre nécessite de faire des choix méthodologiques que l'on peut discuter et comporte des limites importantes, mais c'est à ce jour la meilleure méthode permettant d'intégrer dans une même analyse les différentes facettes d'un projet, en particulier d'intégrer dans une même évaluation les approches économiques et sociales et les approches écologiques.

L'évaluation socioéconomique vise à guider les choix publics, non à les contraindre. Les évaluations offrent au décideur une « matière à penser » indépendante des positions des lobbies ; elle ne vise en aucun cas à automatiser les choix ou à se substituer à la définition des priorités stratégiques.



CHAPITRE 6

UNE BOUSSOLE POUR L'INVESTISSEMENT ET L'ACTION

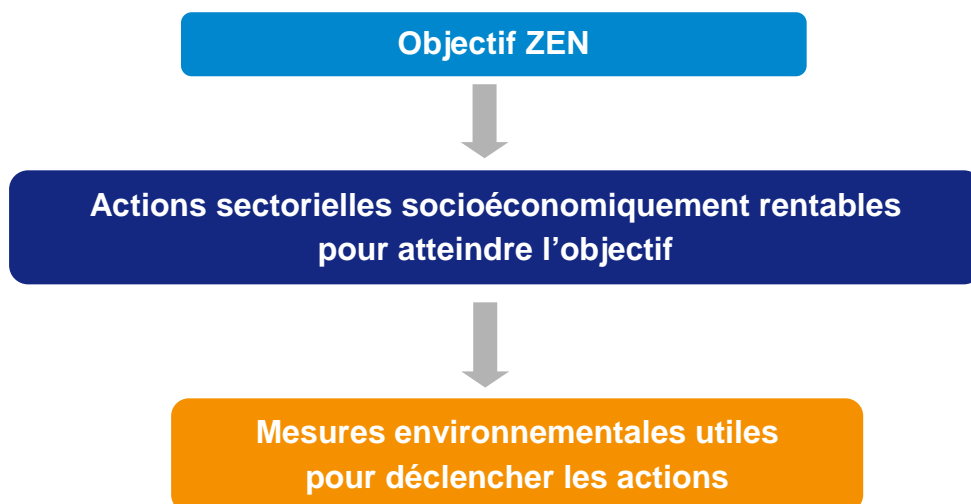
La valeur de l'action pour le climat ou valeur tutélaire du carbone constitue l'ingrédient de base d'un cadre d'évaluation qui doit permettre de répondre à trois questions fondamentales :

- le pays est-il sur la « bonne » trajectoire de décarbonation, c'est-à-dire sur le chemin lui permettant d'atteindre *in fine* l'objectif ZEN ? La réponse relève d'un suivi quantitatif des flux d'émissions par secteur et des puits de carbone ;
- la trajectoire observée permet-elle d'atteindre l'objectif fixé au meilleur coût ? Pour répondre à cette question, le coût d'abattement des différentes actions sectorielles de décarbonation (actions de rénovation thermique des bâtiments, de déploiement des véhicules décarbonés, de réduction des émissions agricoles, etc.) peut être comparé à la trajectoire de valeur tutélaire. Cette comparaison doit aider à fixer les priorités de politique publique ;
- les actions sont-elles appelées par ordre de mérite ? Les gisements de réduction des émissions de GES à bas coût doivent être mobilisés en priorité, avant que ne soient lancées les actions plus coûteuses. C'est l'intérêt d'une trajectoire pluriannuelle de valeur tutélaire du carbone de guider le déclenchement en temps utile – ni trop tôt, ni trop tard – des actions efficaces, en tenant compte des délais de réalisation des investissements et des baisses de coûts liés aux effets d'apprentissage.

Ce chapitre propose un cadre général pour évaluer les actions sectorielles de décarbonation, ainsi que les mesures de politique environnementale venant en soutien des actions jugées pertinentes pour la collectivité. Il montre le rôle structurant que peut jouer la valeur tutélaire du carbone dans la construction et la mise en œuvre de ce cadre d'évaluation.

1. La valeur de l'action pour le climat permet de préciser des actions sectorielles de décarbonation utiles à la collectivité

Pour atteindre l'objectif ZEN, il faut d'abord définir le champ des actions sectorielles pertinentes à mobiliser. C'est ensuite que se pose la question des mesures qui peuvent être nécessaires pour déclencher les actions jugées pertinentes.



Une action sectorielle de décarbonation, quelle que soit sa forme, peut être considérée comme un investissement, car elle représente un effort initial qui permet ensuite de réduire durablement la quantité de CO₂e émise. Cet investissement peut être mesuré en euros à la tonne de CO₂e évitée, ce que l'on appelle coût d'abattement. C'est ce coût qui doit être comparé à la trajectoire de valeur tutélaire du carbone pour évaluer si l'action de décarbonation est pertinente du point de vue de la collectivité. Si une action réduisant les émissions de 1 tCO₂e chaque année pendant dix ans représente un coût de 100 € par tonne de CO₂e évitée et que la valeur tutélaire actualisée moyenne est de 150 € par tonne, celle-ci peut être considérée comme pertinente pour la collectivité. Plus généralement :

- toutes les actions de décarbonation dont le coût d'abattement est inférieur à la moyenne de la valeur tutélaire du carbone actualisée sur la durée de l'action sont pertinentes pour la collectivité ;
- les autres induisent en première approche des surcoûts par rapport à un chemin efficace.

1.1. L'évaluation des coûts d'abattement socioéconomiques

L'évaluation socioéconomique a été historiquement élaborée pour les investissements publics. Mais elle mérite d'être élargie à toutes les actions. En effet, les investissements publics ne peuvent porter seuls toute la transition bas carbone et ils interviennent plutôt en facilitateur, en offrant aux acteurs privés – entreprises et ménages – des alternatives décarbonées.

L'instrument de référence pour évaluer les actions de décarbonation est le coût d'abattement. Celui-ci se définit comme l'écart de coût actualisé entre l'action de décarbonation et la solution de référence carbonée équivalente, rapporté aux émissions de gaz à effet de serre évitées par l'action. L'écart de coût est actualisé car le coût d'abattement intègre les coûts liés à l'investissement initial, mais aussi les coûts liés à l'usage de cet investissement tout au long de sa durée de vie. Ce rapport fait le choix de ne pas actualiser les émissions si bien que le coût d'abattement ne dépend que du volume total abattu, non de la chronique précise des abattements.

De manière générale, la formule de calcul du coût d'abattement socioéconomique est la suivante :

$$CA = \frac{\Delta\text{investissement} + \Delta\text{fonctionnement} - \Delta\text{cobénéfices}}{\sum_i \Delta\text{émissions}_i}$$

Avec :

- CA : le coût d'abattement ;
- $\Delta\text{investissement}$: le surcoût potentiel de l'investissement, comparé à la technologie carbonée de référence ;
- $\Delta\text{fonctionnement}$: le surcoût potentiel de fonctionnement de l'équipement comparé à la technologie carbonée de référence, actualisé au taux d'actualisation socioéconomique ;
- $\Delta\text{cobénéfices}$: les cobénéfices potentiels de la solution décarbonée comparé à la technologie carbonée de référence, actualisés au taux d'actualisation socioéconomique ;
- $\Delta\text{émissions}_i$: les moindres émissions de gaz à effet de serre l'année i , comparé à ce qu'elles seraient avec la technologie carbonée, que l'on somme sur la durée de vie de l'équipement.

De manière équivalente, la formule peut s'écrire (en notant a le taux d'actualisation socioéconomique) :

$$0 = -\Delta\text{investissement} - \Delta\text{fonctionnement} + \Delta\text{cobénéfices} + \sum_i \Delta\text{émissions}_i * CA$$

Cette formule est très proche de la formule mesurant l'écart de valeur actuelle nette (VAN) socioéconomique entre l'investissement décarboné et l'investissement carboné (en notant VT_i la valeur tutélaire du carbone l'année i) :

$$\Delta VAN = -\Delta\text{investissement} - \Delta\text{fonctionnement} + \Delta\text{cobénéfices} + \sum_i \frac{\Delta\text{émissions}_i}{(1+a)^i} * VT_i$$

Qui s'écrit, lorsque la valeur tutélaire croît au taux d'actualisation :

$$\Delta VAN = -\Delta\text{investissement} - \Delta\text{fonctionnement} + \Delta\text{cobénéfices} + \sum_i \Delta\text{émissions}_i * VT_0$$

Ainsi, si la valeur tutélaire croît comme le taux d'actualisation socioéconomique, une action sectorielle de décarbonation est rentable socioéconomiquement lorsque son coût d'abattement est inférieur à la valeur tutélaire l'année de l'investissement. Si la valeur tutélaire croît à un rythme différent, il faut comparer le coût d'abattement à la moyenne de la valeur tutélaire actualisée (pondérée par les réductions annuelles d'émissions).

Pour rendre comparables les coûts d'abattement des différentes actions sectorielles possibles, il est nécessaire de définir un socle commun de règles d'évaluation. Dans ce cadre, une attention particulière doit être donnée à la situation de référence. Ainsi, l'impact sur les émissions des énergies renouvelables électriques n'est pas le même selon qu'elles remplacent des centrales à gaz ou à charbon émettrices de GES ou des centrales nucléaires décarbonées. De même l'écart de coût de production n'est pas le même selon que l'on compare la source d'énergie renouvelable électrique à une centrale au gaz ou à une centrale nucléaire. Il faut également, dans la mesure du possible, tenir compte des émissions sur le cycle de vie complet de l'équipement (par exemple, il faut tenir compte des émissions lors de la fabrication de la batterie d'un véhicule électrique).

Le coût d'abattement calculé ici est un coût d'abattement socioéconomique, en se plaçant du point de vue de l'intérêt de la collectivité. Cela entraîne trois conséquences importantes :

- les coûts considérés sont hors impacts financiers des taxes et subventions, dans la mesure où celles-ci représentent des transferts monétaires au sein de la collectivité, sans incidence nette sur le bilan socioéconomique de l'investissement ;
- il faut tenir compte des cobénéfices d'une action de décarbonation (par exemple la réduction de la pollution locale et du bruit permise par le déploiement du véhicule électrique). Ces cobénéfices doivent être valorisés sur la base des valeurs tutélaire définies pour ces externalités, et déduits du coût d'abattement ;

- enfin, le taux auquel les coûts et gains doivent être actualisés est le taux d'actualisation public et non le taux des marchés financiers.

Les évaluations de coûts d'abattement socioéconomiques permettent de fixer les priorités sur la base d'une analyse coûts-efficacité. On peut ainsi classer les actions sectorielles de décarbonation en fonction de leur coût d'abattement:

- **Les actions à coûts d'abattement nuls ou négatifs**, notamment parce qu'elles n'engagent pas d'investissement significatif : il s'agit de cas où il n'y a pas de surcoût pour la collectivité à passer à la technologie ou au comportement décarboné, voire où il y a un gain à le faire sans même valoriser les émissions évitées. Ces actions doivent donc être entreprises immédiatement, sous réserve, naturellement, de leur faisabilité opérationnelle et de la mise en place des éventuelles mesures d'accompagnement nécessaires, notamment sur le plan social :
 - dans le registre de la sobriété : l'achat d'un véhicule plus adapté aux besoins en lieu et place d'un véhicule plus puissant et plus grand à l'occasion d'un renouvellement (car alors le prix d'achat et la facture des carburants sont plus faibles, pour le même usage) ou l'optimisation manuelle du chauffage d'un bâtiment au cours de la journée (car alors la facture de chauffage peut être réduite sans installer de dispositif particulier) ;
 - dans le registre du partage : le recours au covoiturage¹.
- **Les actions à coût d'abattement positif mais relativement faible**, inférieur à 100 €/tCO_{2e}. C'est notamment le cas de certaines actions d'isolation thermique, de l'installation de pompes à chaleur ou du passage à des bus électriques en milieu très dense.
- **Les actions dont le coût d'abattement se situe autour de 200 €/tCO_{2e}-250 €/tCO_{2e}**. Cela concerne notamment l'adoption de voitures électriques au lieu de véhicules thermiques.
- **Les actions dont le coût d'abattement reste élevé**, en l'état actuel des connaissances, comme le recours à l'hydrogène décarboné dans les transports, l'industrie ou la production d'énergie, ou la capture et la séquestration du carbone. Les coûts d'abattement pourraient être ultérieurement revus à la baisse en cas d'avancée technologique ou de hausse des prix des énergies fossiles

L'encadré 12 ci-dessous présente des évaluations de coûts d'abattement tirées de quelques études récentes.

¹ Dans le cas où il ne nécessite pas la mise en place d'infrastructures spécifiques.

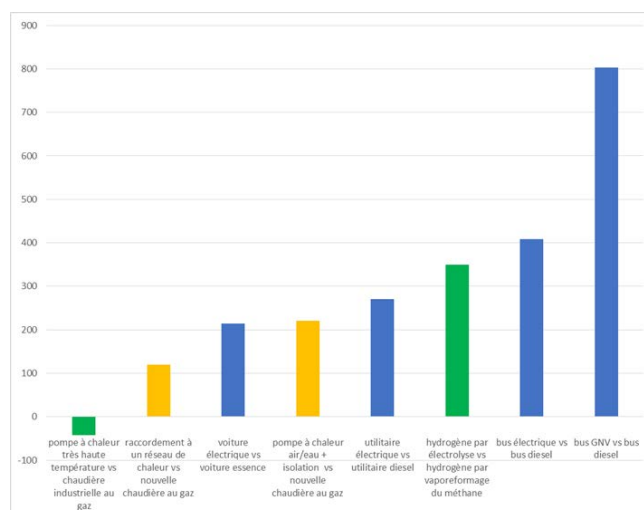
Encadré 12 – Quelques études récentes relatives au coût d'abattement

Cet encadré présente des exemples de coûts d'abattement issus de trois sources : une publication du cabinet Carbone 4 (voir figure 48), une contribution du Commissariat général au développement durable (CGDD, voir figure 49) et un calcul réalisé sur la base d'une étude de la Direction générale du Trésor (voir figure 50). Le champ des technologies varie, de même que certaines hypothèses ou le niveau de détail retenu, si bien que les résultats ne sont pas toujours comparables. En particulier, seule la contribution du CGDD intègre les cobénéfices des actions de décarbonation. Par ailleurs, l'étude de Carbone 4 présente des coûts d'abattement calculés sans actualiser les émissions évitées, contrairement aux deux autres exemples présentés.

L'étude de Carbone 4

Les évaluations du cabinet Carbone 4 illustrent la grande hétérogénéité des coûts d'abattement entre secteurs et au sein d'un même secteur. Elles illustrent également l'existence de coûts d'abattement négatifs (pompe à chaleur très haute température pour certaines industries).

Figure 48 – Coût d'abattement publié par Carbone 4, en €/tCO₂e, pour un investissement réalisé aujourd'hui

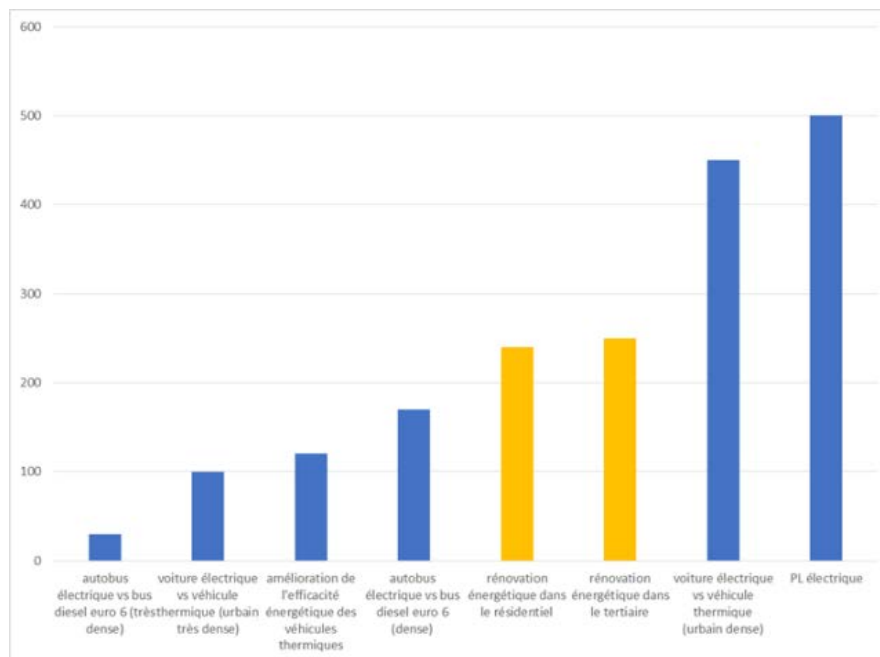


Source : Carbone 4, baromètre de la décarbonation, novembre 2018. Orange : logement ; bleu : transport ; vert : industrie. La méthode utilisée ne tient pas compte des cobénéfices mais intègre les émissions liées à la production des batteries pour véhicules électriques. Dans le calcul, les émissions au dénominateur ne sont pas actualisées. On peut comparer le coût d'abattement socio-économique calculé pour une période d'investissement donnée à la valeur moyenne de la VTC actualisée sur cette période (pondérée par les émissions évitées par le projet ou la mesure année par année), c'est-à-dire qu'on peut comparer le coût d'abattement à la valeur tutélaire du carbone initiale dans le cas où celle-ci croît au taux d'actualisation.

L'étude du Commissariat général au développement durable

La contribution du CGDD présente des évaluations de coûts d'abattement nets des cobénéfices. Ainsi, la prise en compte du coût de la pollution locale et du bruit permet d'évaluer de manière plus précise le coût d'abattement des véhicules électriques lorsqu'on cible leur usage sur le milieu urbain très dense, comparé à un usage en milieu seulement dense : le coût d'abattement de la voiture électrique passerait ainsi d'environ 450 €/t en milieu dense à 100 €/t en milieu très dense, et le coût du bus électrique de 170 €/t à 30 €/t.

Figure 49 – Coût d'abattement d'après la contribution transmise par le CGDD, en €/tCO₂e, pour un investissement réalisé en 2020



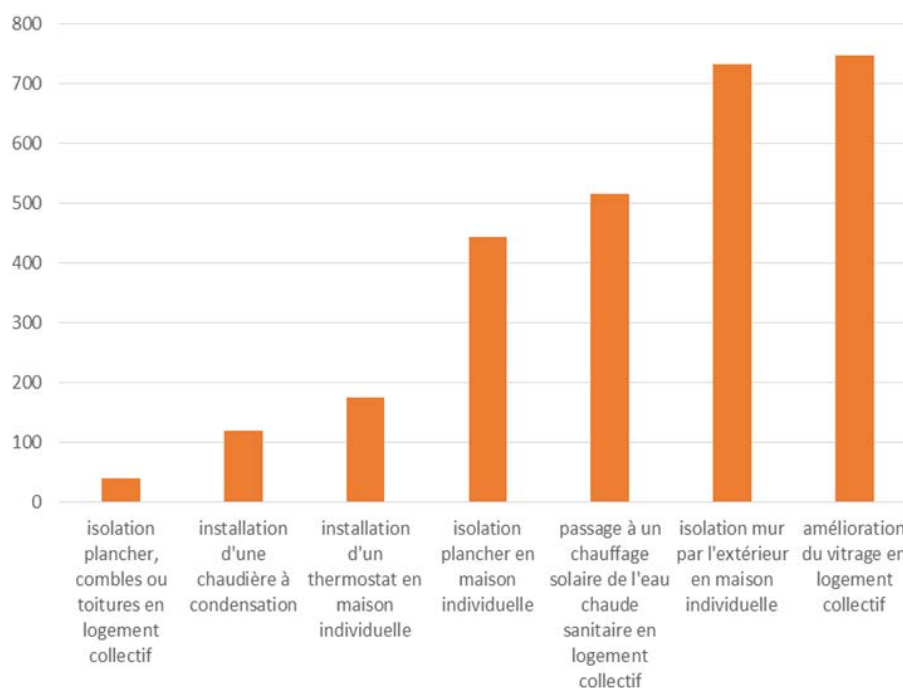
Source : CDGG 2019, contribution au présent rapport. Orange : logement ; bleu : transport. Pour le détail, voir les Compléments au rapport. Certains calculs tiennent compte du coût d'opportunité des fonds publics, et certains calculs tiennent compte de la pollution locale. Les émissions liées à la fabrication des batteries pour véhicules électriques sont prises en compte. Dans le calcul, les émissions au dénominateur sont actualisées. On peut comparer le coût d'abattement socio-économique calculé pour une période d'investissement donnée à la valeur moyenne de la valeur tutélaire du carbone sur cette période (pondérée par les émissions évitées par le projet ou la mesure année par année actualisées).

La contribution du CGDD illustre également l'impact que peuvent avoir le progrès technique et l'évolution du prix des énergies fossiles sur l'évolution des coûts d'abattement. Ainsi, le coût d'abattement du poids lourd électrique pourrait être divisé par deux entre 2020 et 2030 (passage de 500 €/t à 250 €/t), sous l'effet combiné de la baisse du coût de la batterie et de la hausse du prix du baril de pétrole.

Calculs appliqués à la rénovation des logements, sur la base d'une étude de la Direction générale du Trésor

Les coûts d'abattement présentés ci-dessous sont calculés à partir d'une étude portant sur les économies d'énergies actualisées que permettent de réaliser certains gestes de rénovations.

Figure 50 – Coûts d'abattement, calculs sur la base d'un document de travail de la DG Trésor, en €/tCO₂e, pour un investissement réalisé aujourd'hui



Source : calculs à partir de « *Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ?* », Les Cahiers de la DG Trésor, n° 2017-02, mars, p. 15. Les chiffres en €/MWh cumac du document cité ont été ramenés en €/tCO₂ en supposant que l'équipement de référence est une chaudière à gaz, que la durée de vie pour les gestes d'isolation est de trente ans, de vingt ans pour la chaudière à condensation et le chauffe-eau solaire, et de douze ans pour le thermostat. Dans le calcul, les émissions au dénominateur ne sont pas actualisées. La méthode utilisée ne tient pas compte des cobénéfices et le taux d'actualisation retenu dans le document initial et pour les calculs présentés ici est de 4 %

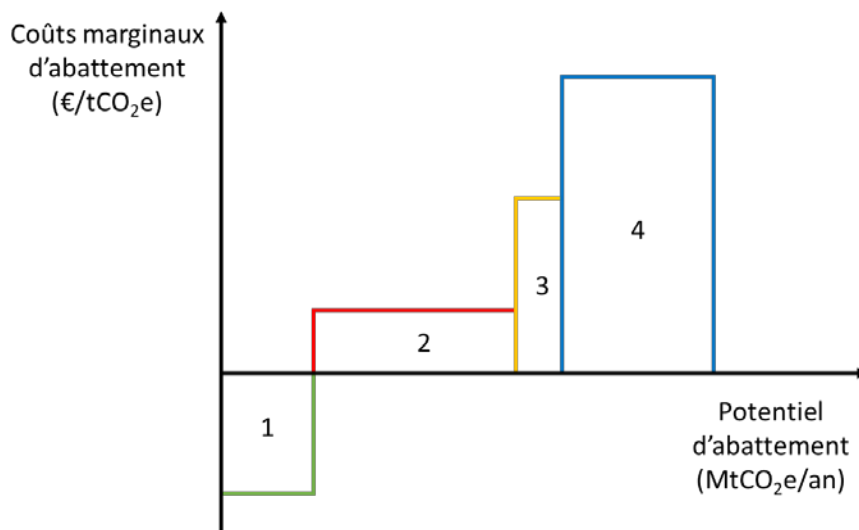
Au total, il importe de définir et de stabiliser des règles d'évaluation afin de faciliter les comparaisons, fixer les bonnes priorités et définir l'ordre de mérite des actions pertinentes.

1.2. Une approche dynamique de l'ordre de mérite

Le coût d'abattement d'une action de décarbonation peut être comparé à la valeur tutélaire du carbone actualisée moyenne sur la durée de vie de l'équipement : s'il est inférieur à la valeur tutélaire, l'action sectorielle est utile du point de vue de la collectivité et doit être mise en œuvre.

Pour que la stratégie de décarbonation soit efficace, la logique générale du déploiement des technologies est de procéder par ordre de mérite, c'est-à-dire de mobiliser en priorité les technologies dont le coût d'abattement (en €/tCO₂e) est inférieur à la valeur tutélaire actualisée moyenne¹ sur la durée de vie, pour mobiliser ensuite au cours du temps des technologies plus onéreuses. Cet ordre de mérite peut être représenté par les courbes de coût marginal d'abattement (voir figure 51), classant les actions de décarbonation suivant une logique de coûts croissants (en ordonnées) tout en indiquant le potentiel d'abattement d'émissions de GES de chaque action (en abscisses)². Ces courbes représentent un ensemble d'actions à mobiliser progressivement, d'aujourd'hui à l'année cible, dans une logique de minimisation du coût total d'abattement permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

Figure 51 – Coût marginal d'abattement



Source : d'après Vogt-Schilb A., Hallegatte S. et De Gouvello C. (2014), « *Marginal abatement cost curves and quality of emission reductions: A case study on Brazil* », *Climate Policy*, Taylor

¹ Pondérée par les réductions d'émissions annuelles.

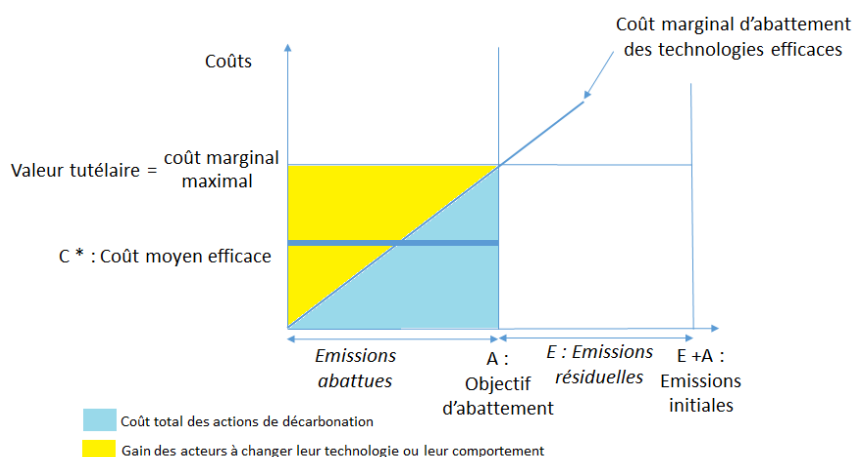
² Vogt-Schilb A., Hallegatte S. et de Gouvello C. (2014), « Long-term mitigation strategies and marginal abatement cost curves: A case study on Brazil », *Policy Research working paper*, n° WPS 6808, Washington DC, World Bank Group.

L'encadré 13 ci-dessous précise graphiquement l'intérêt d'une telle hiérarchisation des actions, qui permet de concilier efficacité écologique et efficacité économique.

Encadré 13 – Valeur de l'action pour le climat et sélection des actions pertinentes

Comme l'illustre la figure 52 ci-dessous, si la logique de l'ordre de mérite est bien appliquée pour sélectionner les actions, la collectivité réalise des réductions d'émissions pour un volume A^1 en mobilisant les actions les moins coûteuses. Le coût total de mise en œuvre est l'aire en bleu.

Figure 52 – Cas d'une mobilisation des actions de décarbonation par ordre de mérite



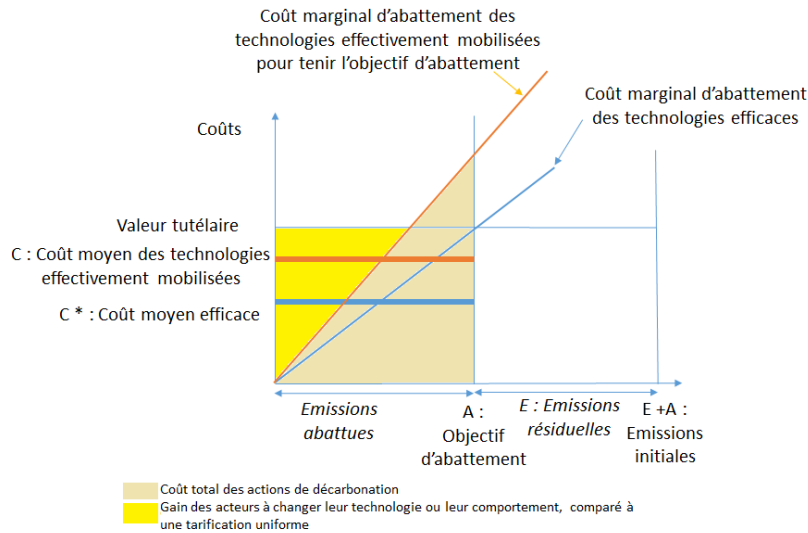
Source : France Stratégie

La figure 53 illustre le cas où les actions de décarbonation ne seraient pas déclenchées par ordre de mérite, le coût d'abattement de certaines actions dépassant la valeur tutélaire. Le coût total des actions de décarbonation réalisées est égal à l'aire sous la droite de coût marginal d'abattement des technologies effectivement mobilisées (diagonale orange), alors que le même résultat en termes d'abattement (A) aurait pu être atteint pour bien moins cher : une approche par ordre de mérite aurait conduit à un coût égal à l'aire du triangle sous la droite de coût marginal d'abattement des technologies efficaces (diagonale bleue). Dit autrement, pour un même volume d'abattement A, le coût moyen des actions de décarbonation effectivement réalisées (C) est supérieur au

¹ Pour simplifier et à titre illustratif, on suppose dans cet encadré que l'action de décarbonation ne produit ses effets que pendant une année, ce qui permet de comparer le coût d'abattement à la valeur tutélaire et non à la moyenne de la valeur tutélaire sur plusieurs années.

coût moyen qui aurait pu être atteint si on avait mobilisé les actions les plus efficaces (C^*).

Figure 53 – Cas où les actions ne sont pas mobilisées par ordre de mérite



Source : France Stratégie

Cette illustration traditionnelle de l'ordre de mérite doit être affinée pour tenir compte des délais de déploiement des différentes actions et des effets d'apprentissage. En effet, il n'est pas toujours pertinent d'attendre d'avoir épuisé l'ensemble du potentiel des technologies présentant les coûts d'abattement les plus faibles pour investir dans des technologies plus coûteuses.

- Il est nécessaire de tenir compte des contraintes temporelles qui pèsent sur le déploiement des investissements de décarbonation, qu'il s'agisse de la vitesse d'installation de bornes de recharge pour véhicules électriques sur le territoire ou de la vitesse de rénovation du parc de logements, qui dépend notamment du nombre de personnes formées dans le domaine, ou encore de la vitesse de renouvellement du parc de véhicules ou de machines.
- Il faut aussi tenir compte du potentiel de progrès technique que peut recéler le déploiement précoce d'une technologie, *via* des effets d'apprentissage¹ et des économies d'échelle.

¹ Perissin-Fabert B. et Foussard A. (2016), *Trajectoires de transition bas carbone au moindre coût*, Thema Analyse, ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.

Cette vision dynamique de l'ordre de mérite conduit en particulier à recommander un déclenchement précoce d'investissements dont les délais de réalisation et les bénéfices s'étalent sur le temps long. À cet égard, la trajectoire de valeur tutélaire du carbone proposée, marquée par une forte croissance de la valeur jusqu'aux points d'équilibre de 2030 et de 2040, ne doit évidemment pas être interprétée comme une incitation à différer les premiers efforts. Cette commission, comme celle de 2008 avant elle, assume en début de période de « déroger » à la règle de Hotelling sur la base de deux considérations :

- il est légitime, pour ne pas créer de « saut » sur le niveau initial de la valeur tutélaire du carbone, d'assumer une période de croissance rapide de cette valeur jusqu'aux points d'équilibre de 2030 et 2040 ;
- la valeur tutélaire du carbone a vocation à servir de « boussole » aux investissements de décarbonation. Or ces investissements présentent deux grandes caractéristiques qui les rendent davantage sensibles à la valeur future du carbone qu'à sa valeur immédiate :
 - ce sont des décisions qui s'échelonnent dans le temps, au rythme du renouvellement des bâtiments, logements, usines, flottes de véhicules ;
 - ce sont des décisions de long terme, soit que la durée de vie des investissements soit longue, soit que l'investissement ait vocation à être renouvelé en fin de vie pour maintenir l'actif dans la durée. De ce fait, il faut valoriser les bénéfices tout au long de la durée de vie de l'actif, et pas seulement les toutes premières années de mise en service.

Ces deux considérations vont de pair avec une exigence : que la trajectoire de réduction des émissions et celle de la valeur qui lui est associée soient rendues lisibles et crédibles, pour être anticipées et prises en compte dans les décisions des investisseurs publics et privés.

1.3. Une référence étendue à l'ensemble de l'économie

La valeur de l'action pour le climat constitue une référence unique : la valeur d'une tonne de CO₂e non émise est la même pour la société, quel que soit le secteur à l'origine de cette réduction.

Dans la perspective d'un objectif « zéro émissions nettes », la valeur tutélaire du carbone a vocation à servir de référence sur le périmètre d'actions le plus large possible car toutes les activités de la société sont concernées.

- Parvenir à une décarbonation profonde de l'économie nécessite d'élargir le champ des actions publiques et privées de lutte contre le changement climatique, pour

couvrir l'ensemble des émissions liées aux procédés industriels, à l'agriculture, à l'usage des sols ou au traitement des déchets, et pour stimuler le développement des puits de carbone.

- L'ensemble des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote, composés fluorés) doivent être pris en compte et tous les secteurs de l'économie doivent réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Le secteur de l'usage des terres requiert désormais une attention particulière car il peut permettre le développement de puits de carbone naturels, tout en fournissant de la biomasse à usage énergétique.
- L'ensemble des acteurs publics et privés est concerné :
 - l'État, les collectivités territoriales, les établissements publics ;
 - les acteurs privés : entreprises, acteurs de la finance climat, ménages. C'est l'addition d'une multitude de choix individuels, d'investissements et de changements d'habitude qui permettront d'atteindre l'objectif de neutralité carbone.

2. La valeur privée des actions doit être rapprochée de leur valeur socioéconomique

Certaines actions de décarbonation utiles à la société sont spontanément rentables du point de vue privé, et peuvent donc être déclenchées sans intervention publique particulière. Ce sont les actions pour lesquelles le bilan financier – en tenant compte des coûts d'investissement et des coûts d'usage – est favorable à la technologie décarbonée. Dans ce cas, la rentabilité privée rejoint la rentabilité socioéconomique.

Cependant, les actions de décarbonation pertinentes du point de vue de la collectivité ne sont pas toutes rentables financièrement par les acteurs privés. C'est souvent le cas si aucune politique publique ne permet d'internaliser l'objectif de réduction des émissions. L'absence de déploiement par les agents privés peut aussi être liée à un manque d'information sur les opportunités d'abattement, un accès au crédit pour investir contraint ou des risques de développement de nouvelles technologies jugés trop importants.

Dans ces cas de figure, des mesures publiques sont nécessaires pour rapprocher les valeurs privées des actions de décarbonation de leur valeur pour la collectivité : un investissement public permet de déployer une nouvelle infrastructure bas carbone, une réglementation peut rendre l'action obligatoire, une taxe sur les émissions de CO₂ peut améliorer la compétitivité de la technologie décarbonée, une subvention contribue à

financer l'acquisition de cette technologie, une garantie peut permettre de partager les risques de développement, etc.

2.1. Une décarbonation profonde des activités humaines repose nécessairement sur un éventail de mesures complémentaires

Lorsque des actions de décarbonation utiles à la société ne sont pas spontanément mises en œuvre, il revient à l'État d'identifier les leviers les plus pertinents pour les déclencher. La question de la panoplie des mesures permettant de favoriser les actions de décarbonation dépasse le champ de ce rapport, sachant qu'elle engage des enjeux redistributifs, sociaux, budgétaires, industriels, etc. La valeur de l'action pour le climat donne une mesure du chemin à parcourir et aide à définir le périmètre des actions sectorielles et des investissements rentables pour la collectivité, sans préjuger des mesures nécessaires pour déclencher ces actions et ces investissements. On peut ici illustrer le propos en mettant en évidence deux logiques possibles de construction de cette panoplie de mesures très différentes l'une de l'autre.

La première consiste à donner un rôle central au signal-prix. Si la tarification du carbone est placée au niveau du coût marginal d'abattement maximal cohérent avec l'objectif de décarbonation poursuivi, on s'assure que les objectifs climatiques seront atteints dans des conditions économiquement efficaces : les acteurs seront incités à réaliser toutes les actions de décarbonation de coût inférieur à la taxe, et les actions à coût excessif seront écartées, sans que l'État ait besoin de connaître les coûts d'abattement des acteurs et de piloter finement leurs actions. De plus, les entreprises seront incitées à innover pour proposer des solutions décarbonées.

Cette logique est celle d'un monde où toutes les politiques publiques seraient déjà bien alignées sur l'objectif de neutralité carbone. Cela supposerait notamment que :

- des politiques d'urbanisme et de mobilité soient mises en cohérence, pour réduire les besoins de déplacement ;
- les acteurs disposent d'alternatives décarbonées (réseaux d'infrastructure appropriés, solutions technologiques) et des moyens de financer des investissements de décarbonation rentables (accès au crédit, facilité, garanties publiques permettant de couvrir certains risques) ;
- l'État est capable de séparer la question de la mise en place d'une tarification efficace du carbone de celle du traitement de ses effets redistributifs ou de ses impacts sur la compétitivité, en adoptant par exemple des dispositions compensatoires.

La seconde logique consiste à considérer que la transition vers la neutralité carbone doit reposer sur un alignement de l'ensemble des politiques publiques

sur l'objectif ZEN et une agrégation « intelligente » de mesures complémentaires. C'est l'approche retenue par l'OCDE¹ et la commission Stern-Stiglitz².

La commission s'inscrit dans cette seconde logique. La tarification du carbone est indispensable pour établir la vérité des prix écologiques, donner de la rentabilité aux projets de décarbonation et stimuler la recherche de solutions innovantes. Mais elle fait aussi l'objet de contraintes car, même si son objectif premier est d'être incitative, elle peut affecter le pouvoir d'achat des ménages et la compétitivité des entreprises dans des conditions que les mécanismes de redistribution en place ne permettent pas toujours de bien compenser. Il faut donc agir sur un front plus large pour parvenir à une décarbonation profonde des activités humaines et notamment :

- aligner le cadre réglementaire sur un niveau d'ambition climatique plus élevé, dans le domaine notamment de l'urbanisme (pour modérer les prix fonciers et immobiliers au sein des villes), de la performance énergétique et environnementale des bâtiments, des rejets des installations industrielles, de la construction automobile ;
- stimuler la recherche et développement ;
- améliorer la compétitivité des technologies décarbonées par rapport aux technologies carbonées ;
- partager si nécessaire les risques de développement technologique et de déploiement initial grâce à des mécanismes de garanties, comme proposé par exemple dans le rapport *Pour la création de France Transition* de Pascal Canfin et Philippe Zaouati³.

2.2. L'évaluation par usage de l'ensemble des mesures de décarbonation mises en œuvre doit être renforcée

Pour un usage donné (utilisation d'une voiture, d'un chauffage, d'une installation industrielle ou agricole, etc.) se cumulent souvent un assez grand nombre de mesures incitant à la décarbonation. Par exemple, pour réduire les émissions des véhicules particuliers se combinent des normes d'efficacité énergétique et de pollution, le bonus-

¹ OCDE (2015), *Aligner les politiques publiques au service de la transition vers une économie bas carbone*, Réunion du Conseil au niveau des Ministres, Éditions OCDE, Paris.

² Stern N. et Stiglitz J.(2017), *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*, Carbon Pricing Leadership Coalition.

³ Canfin P. et Zaouati P. (2018), *Pour la création de France Transition. Des mécanismes de partage de risques pour mobiliser 10 milliards d'euros d'investissements privés dans la transition écologique*, rapport au ministre de la Transition écologique et solidaire et au ministre de l'Économie et des Finances, décembre.

malus sur l'acquisition des véhicules, la prime à la conversion, la fiscalité des carburants, et peut-être à l'avenir des zones à faibles émissions ou des péages urbains. Cette accumulation n'est pas en soi un problème, chaque mesure pouvant cibler une incitation spécifique au moment de l'acquisition ou de l'usage. Encore faut-il disposer d'une vue agrégée des incitations et obligations mises en place pour évaluer si cette agrégation assure la rentabilité des actions dont le coût d'abattement est jugé acceptable par la collectivité. Il faut s'assurer que le cumul de mesures est suffisant. Il faut également s'assurer que le coût implicite de mise en conformité induit par les normes, moins transparent que les signaux-prix, n'est pas excessif pour tout ou partie des acteurs. Force est de constater que ces évaluations sont à ce stade insuffisamment disponibles. La commission recommande que de telles évaluations soient effectuées, tout en soulignant que celles-ci ne relèvent pas de simples additions mais nécessitent de développer un cadre d'évaluation rigoureux.

Évaluer les incitations

Pour analyser si l'agrégation des mesures permet de déclencher les actions dont le coût d'abattement socioéconomique a été jugé pertinent, il n'est pas possible de sommer simplement les signaux-prix envoyés par les taxes, les marchés de quotas, les subventions et le coût implicite des réglementations. Construire cette analyse agrégée demande un travail minutieux. Comme le démontre l'OCDE¹, cela nécessite en effet de :

- déterminer usage par usage la réduction d'émissions permise grâce aux actions de décarbonation déclenchées par l'ensemble des mesures. Dans certains cas, cette évaluation peut être simple (par exemple, obligation de remplacer tel équipement par tel autre). Dans d'autres cas, le calcul nécessite de tenir compte des changements de comportement des acteurs (par exemple, une tarification du carbone va réduire les émissions de GES dans une proportion qui dépend de l'élasticité de la consommation des acteurs au prix de l'énergie) ou de l'interaction entre deux actions (par exemple, deux réglementations permettant chacune de réduire de 50 % la consommation d'énergie d'un logement ne conduisent pas à une baisse de la consommation de 100 %) ;
- prendre en compte la différence de nature entre les incitations portant sur l'investissement dans un nouvel équipement ou sur l'usage de cet équipement. Ces deux incitations devraient en théorie être prises en compte lors d'un choix d'investissement car elles conditionnent sa rentabilité même si, en pratique, une subvention ou un système de bonus/malus à l'investissement peut être plus visible et incitatif qu'une tarification à l'usage. Une fois l'achat réalisé, seules les mesures

¹ OCDE (2014), *Prix effectifs du carbone*, Éditions OCDE, Paris.

portant sur l'usage peuvent contribuer à réduire les émissions (par exemple, une fois qu'un véhicule est acheté, seules la fiscalité sur les carburants et les éventuelles restrictions d'usage des véhicules jouent sur les émissions résiduelles). Les deux mesures ne portent donc pas sur la même assiette de réduction d'émissions, et l'analyse de leur impact nécessite de tenir compte d'une élasticité à l'achat et d'une élasticité à l'usage.

Évaluer les effets redistributifs

Toutes les mesures de politique environnementale ont des effets redistributifs. Ceux qui sont cachés méritent d'être explicités.

La tarification du carbone oriente l'effort d'investissement vers les acteurs dont les coûts d'abattement sont inférieurs au signal-prix. Ces incitations peuvent induire des effets redistributifs non désirés qui doivent être évalués pour pouvoir construire les mécanismes de compensation et de construction d'alternatives décarbonées les mieux ciblées.

Les réglementations imposent des coûts d'abattement potentiellement très hétérogènes entre acteurs, avec des effets redistributifs cachés et plus difficiles à discerner que dans le cas d'une tarification. Il est essentiel d'explicitier les effets redistributifs des réglementations et les coûts implicites qu'elles imposent aux différentes catégories d'acteurs, comme on le fait pour la fiscalité.

Les subventions réduisent l'effort pesant sur les acteurs qui investissent, car celui-ci est pris en charge par la collectivité¹. Néanmoins, si elles sont mal ciblées, les subventions peuvent conduire à faire supporter par la collectivité le coût d'actions qui auraient de toute façon été réalisées par les acteurs privés, ce que l'on désigne sous le terme d'« effet d'aubaine ». Là aussi, il convient d'explicitier les effets redistributifs des contribuables vers les bénéficiaires de subventions.

Évaluer les incidences industrielles

Dans le même esprit, l'incidence industrielle des mesures publiques doit être mieux explicitée. Réaliser des efforts précoces de décarbonation peut permettre l'émergence de nouveaux acteurs sur des filières encore peu matures (énergies renouvelables, gestion des déchets, rénovation thermique). Toutefois, la mise en place d'une tarification du carbone ou de normes peut renchérir les coûts de production et faire peser un risque

¹ Pour financer une subvention, l'effort peut porter soit sur la collectivité actuelle (financement par l'impôt ou par la baisse d'autres dépenses), soit sur la collectivité future (emprunt).

de « fuites de carbone », c'est-à-dire de délocalisation de la production dans des pays moins impliqués dans la lutte contre le changement climatique. En outre, la hausse des coûts de production peut conduire les entreprises à réduire leurs marges et leur capacité à investir.

Cette attention portée à la compétitivité des entreprises est bien présente dans la conception du marché européen de permis d'émission EU ETS, qui couvre les grandes installations industrielles et la production d'électricité. Ce marché a été conçu pour permettre une répartition efficace de l'effort entre entreprises soumises à l'ETS et pour protéger les entreprises fortement exposées à la concurrence internationale, via le système des quotas gratuits. Toutefois, ce marché n'a pas été calibré pour atteindre la neutralité carbone au niveau de l'Union européenne, ce qui contribue à expliquer une partie de l'écart très important entre la valeur tutélaire du carbone proposée par cette commission et le prix du quota ETS. Pour clarifier les termes du débat, cet écart appelle des travaux complémentaires pour :

- évaluer de manière agrégée les incitations et réglementations auxquelles sont aujourd'hui soumises les entreprises françaises ;
- évaluer au niveau européen quelle devrait être la valeur du carbone compatible avec une cible de neutralité carbone en 2050.

Pour les PME exposées à la concurrence internationale mais qui ne sont pas dans le marché ETS, les dispositifs d'accompagnement peuvent également être pertinents. Il peut s'agir de dispositifs d'aides à l'investissement, de préférence à destination des entreprises qui rencontrent des difficultés financières pour s'adapter (subvention, dispositif de suramortissement). Il peut aussi s'agir d'un accompagnement technique pour optimiser les procédés de production et réduire ainsi les émissions (audit énergétique, audit matière). L'encadré ci-dessous présente deux exemples de dispositifs d'accompagnement.

Encadré 14 – Deux exemples de dispositifs d'accompagnement : certificats d'économies d'énergie et dispositif « TPE-PME, gagnantes sur tous les coûts ! »

Les certificats d'économie d'énergie (CEE), bénéficiant aux ménages comme aux entreprises, permettent de financer des actions d'efficacité énergétique, en limitant le reste à charge pour le bénéficiaire. Le dispositif consiste à imposer aux fournisseurs d'énergie (électricité, gaz, carburant) de détenir un certain nombre de certificats, dépendant du volume de vente de ce fournisseur. Pour obtenir ces certificats, chaque fournisseur doit financer des actions de rénovation agréées chez des tiers (ménages ou entreprises). Ce dispositif est doublement vertueux : il permet aux entreprises de réduire le coût des travaux d'efficacité énergétique

qu'elles entreprennent et qui induiront une baisse de la facture énergétique ; il incite les fournisseurs d'énergie à être aussi efficaces que possible pour obtenir des certificats de la manière la moins coûteuse possible. Cependant, l'appropriation de ce dispositif par les entreprises est encore insuffisante.

Le dispositif « TPE-PME, gagnantes sur tous les coûts ! », piloté par l'Ademe, consiste à préfinancer des audits auprès des entreprises de moins de 250 salariés des secteurs de l'industrie, de la distribution, de la restauration et de l'artisanat pour les aider à optimiser leurs flux d'énergie, de matières, de déchets et d'eau. L'entreprise verse une somme forfaitaire à l'Ademe uniquement si elle a effectivement bénéficié d'économies substantielles à l'issue de l'accompagnement. L'efficacité du dispositif a pu être démontrée sur un premier échantillon en 2016 (en moyenne 50 000 euros économisés par entreprise et par an).

3. Synthèse : le mode d'emploi de la valeur de l'action pour le climat

Sur la base de ces différents éléments, on peut esquisser un mode d'emploi du bon usage de la valeur de l'action pour le climat, autour de trois grandes étapes :

- la valeur de l'action pour le climat doit être mobilisée en amont, dans l'élaboration de la stratégie de décarbonation, pour définir le périmètre des actions rentables et donc les priorités de politique publique ;
- une compréhension suffisamment fine des coûts d'abattement par usage ou par technologie doit ensuite permettre d'identifier parmi les actions pertinentes celles qui seront spontanément engagées par les acteurs privés et celles qui appellent une intervention publique ;
- une combinaison pertinente de mesures publiques doit ensuite être élaborée pour faire levier de manière efficace. Au sein de cette panoplie, l'État doit accorder une importance particulière à l'évaluation socioéconomique des projets d'investissement publics et veiller à ce que le cumul des taxes, subventions et réglementations sur un même usage fournisse une incitation proportionnée au déclenchement des actions utiles. Le partage de l'effort financier entre acteurs, pour sa part, est largement dépendant du choix des mesures, de leur financement et des dispositifs d'accompagnement.

C'est ce qu'illustre le schéma ci-dessous.

Schéma – Mode d'emploi du bon usage de la valeur de l'action pour le climat

Étape 1 – L'action de décarbonation est-elle utile à la collectivité ?

→ *Oui, si le coût d'abattement de l'action est inférieur à la valeur tutélaire (présente et future) du carbone*

Étape 2 – L'action utile à la collectivité est-elle spontanément réalisée par les acteurs privés ?

→ *Non, si l'investissement n'est pas rentable pour l'acteur privé ou s'il existe des obstacles à la réalisation de l'action*

Étape 3 – Quels sont les leviers publics pertinents pour déclencher l'action ?

→ *Le secteur public doit-il créer des infrastructures et des équipements ?*
→ *Le secteur public doit-il prendre des mesures à destination des acteurs privés ?*



CONCLUSION GÉNÉRALE

Les travaux de la commission font ressortir le besoin d'une revalorisation importante de la valeur carbone pour la réaligner sur un niveau d'ambition plus élevé. Cette revalorisation nous apparaît indispensable pour mettre notre pays sur la bonne trajectoire.

Au-delà de 2030, à mesure que l'horizon s'allonge, la trajectoire proposée reste naturellement entourée d'incertitudes croissantes, portant notamment sur les coûts marginaux d'abattement des émissions de gaz à effet de serre. Ces incertitudes conduisent à recommander une révision des travaux sur la valeur tutélaire du carbone à intervalles réguliers – a minima tous les dix ans – pour prendre en compte les évolutions du contexte international, économique et technologique.

Il nous paraît aussi indispensable, sans attendre la prochaine révision, de « muscler » le programme de recherche relatif à la socioéconomie de l'externalité climatique, dans au moins quatre dimensions.

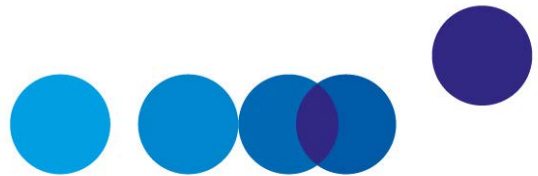
- Les modélisations doivent désormais intégrer l'épuisement des budgets carbone à notre disposition et l'objectif mondial et français de neutralité carbone. Ce nouveau contexte et ces nouveaux objectifs nécessitent d'enrichir les modèles existants en les élargissant à l'ensemble des secteurs, des usages et des gaz à effet de serre, et en affinant l'analyse des comportements d'investissement. Ils nécessitent également de pouvoir décrire plusieurs futurs technologiques possibles, fondés sur une description plus fine des effets d'apprentissage et d'échelle.
- La trajectoire de valeur tutélaire du carbone dépend crucialement du taux d'actualisation sous-jacent. Nous avons ici retenu à titre conservatoire comme référence le taux d'actualisation public de 4,5 %, mais la question de la prise en compte du risque, et notamment de la valeur du « beta climatique » – c'est-à-dire de la corrélation entre le risque climatique et le risque macroéconomique – mérite des travaux complémentaires.

- Le cadre d'évaluation des actions sectorielles n'en est qu'à ses balbutiements. Il est essentiel de poser un cadre méthodologique clair et partagé pour pouvoir évaluer le coût d'abattement socioéconomique des différentes actions. Ce travail nécessite une bonne appréhension des cobénéfices (qualité de l'air notamment), dans la mesure où différents objectifs sont souvent recherchés simultanément.
- Le cadre d'évaluation des projets d'investissement publics mérite d'être substantiellement rénové et élargi. Rénové car l'évaluation des projets d'investissement publics utiles à la décarbonation doit s'inscrire dans un contexte radicalement nouveau : celui de la neutralité carbone post-2050. Une attention particulière doit être attachée au scénario de référence, car c'est ce choix, autant que celui de la revalorisation de la valeur carbone, qui déterminera la rentabilité socioéconomique des projets. Élargi car l'évaluation des projets d'investissement reste pour l'essentiel confinée au domaine des transports et du bâtiment, elle devrait s'étendre aux autres grands secteurs, à commencer par l'énergie.

Last but not least, les évaluations de valeur tutélaire du carbone s'enrichiraient de calculs équivalents faits par nos principaux partenaires européens ou par la Commission européenne. La confrontation de ces valeurs permettrait en effet, au-delà des progrès méthodologiques qu'elle favoriserait, de mettre en valeur les gains d'une coopération internationale plus forte et pourrait contribuer à concevoir la politique climatique de long terme de l'Union européenne et les instruments associés, dans la logique de la neutralité carbone.



ANNEXES



ANNEXE 1

LETTRE DE MISSION

Le Premier Ministre

Paris, le 22 FEV. 2018

Monsieur l'Inspecteur Général,

Donner une valeur monétaire aux émissions de gaz à effet de serre et aux efforts engagés pour les maîtriser est une composante essentielle de la transition écologique. Cette valeur permet d'orienter de manière efficiente les choix d'investissements, de recherche-développement et de financement de l'Etat et des collectivités territoriales, ainsi que ceux des entreprises et de l'ensemble des acteurs économiques et sociaux.

La signature de l'Accord de Paris a constitué un tournant diplomatique majeur et nous oblige à agir dès maintenant pour contenir l'élévation des températures en deçà de 2°C par rapports aux niveaux préindustriels. C'est le sens de l'objectif, fixé en juillet 2017 dans le Plan Climat, d'atteindre la neutralité carbone à horizon 2050 en France.

Au-delà de l'affermissement des objectifs climatiques, plusieurs raisons conduisent à revoir la valeur tutélaire du carbone que vous aviez définie en 2008 : les conditions économiques, les prix des énergies. Les problématiques concernant le mix énergétique ont fortement évolué. Enfin les travaux économiques récents menés au niveau international sur le prix du carbone apportent de nouveaux éléments dans la réflexion sur la valeur sociale du carbone.

Je souhaite donc que vous réunissiez, comme vous l'aviez fait en 2008, une commission pour réviser la valeur tutélaire du carbone. Cette commission, composée d'experts, de représentants des partenaires sociaux et des organisations non gouvernementales, proposera une nouvelle trajectoire cohérente avec les objectifs climatiques de la France. Elle devra aussi formuler des recommandations pour étendre l'usage de cette valeur dans la définition et l'évaluation des politiques publiques, ainsi que dans les choix d'investissement et de financement privés.

Pour mener à bien ces travaux, vous vous appuyerez sur les équipes de France Stratégie.

Afin que cette nouvelle valeur tutélaire puisse être pleinement intégrée dans la version de la stratégie nationale bas-carbone qui sera mise en consultation au second semestre 2018, vous me remettrez fin juin 2018 une version provisoire de votre rapport présentant la trajectoire de la valeur tutélaire du carbone. Vous me remettrez votre rapport définitif en novembre 2018.

Je vous prie de bien vouloir agréer, Monsieur l'Inspecteur Général, l'expression de mes sentiments les meilleurs.


Edouard PHILIPPE

Monsieur Alain QUINET
Inspecteur Général des Finances
FRANCE STRATÉGIE
20, avenue de Ségur
75007 PARIS



ANNEXE 2

MEMBRES DE LA COMMISSION

Émilie Alberola, responsable Politiques climatiques et mécanismes de marché, Eco'Act

Luc Baumstark, chargé de mission, Secrétariat général pour l'investissement

Dominique Bureau, délégué général, Conseil économique pour le développement durable, président du Comité pour l'économie verte

Xavier Bonnet, inspecteur général, Insee

François-Nicolas Boquet, directeur environnement-énergie, AFEP

Stéphane de Cara, directeur de recherche, Inra

Pierre-Yves Chanu, conseiller confédéral de la CGT

Thierry Chapuis, délégué général de l'Association française du gaz, intervenant au titre du MEDEF

Anne Chassagnette, directrice de la responsabilité environnementale et sociétale, Engie

Mireille Chiroleu-Assouline, professeur d'économie, Paris School of Economics

Patrick Criqui, directeur de recherche, CNRS

Gilles Croquette, chef du bureau Émissions, projections et modélisations, Direction générale de l'énergie et du climat, ministère de la Transition écologique et solidaire

François Dassa, directeur de la mission Prospective et Relations internationales, EDF

Meike Fink, Réseau Action Climat

Nathalie Girouard, chef de la division Performance et information environnementale, OCDE

Alain Grandjean, associé-cofondateur, Carbone 4

Thibault Guyon, sous-directeur des politiques sectorielles, Direction générale du Trésor

Gilles Lafforgue, professeur d'économie, Toulouse Business School

Franck Lecocq, AgroParisTech, directeur du Cired

Benoît Leguet, directeur général, I4CE

Vincent Marcus, sous-directeur de l'Économie des ressources naturelles et des risques, Commissariat général au développement durable, ministère de la Transition écologique et solidaire

Florent Masseube, juriste environnement et développement durable, CPME

Andrew Prag, chef d'unité, Environnement et changement climatique, Agence internationale de l'énergie

Philippe Quirion, Réseau Action Climat

Ophélie Risler, cheffe du département de lutte contre l'effet de serre, Direction générale de l'énergie et du climat, ministère de la Transition économique et solidaire.

Jean-Michel Trochet, économiste senior, mission Prospective et Relations internationales, EDF

Claire Tutenuit, déléguée générale, Entreprises pour l'environnement (EpE)

Antonin Vergez, chef du bureau de l'Économie des biens communs, Commissariat général au développement durable, ministère de la Transition écologique et solidaire

Dominique Vignon, Académie des technologies

Équipes de modélisation

Cired (modèle IMACLIM)

Meriem Hamdi-Chérif

Julien Lefevre

Modèle ThreeME

Gael Callonec, Ademe

Raphael Cancé, CGDD

Aurélien Saussay, OFCE

Seureco (modèle NEMESIS)

Paul Zagamé

Baptiste Boitier

Enerdata (modèle POLES)

Sylvain Cail

Morgan Crenes

Quentin Bchini

Mines ParisTech (modèle TIMES)

Nadia Maizi

Ariane Milliot

Autres personnes ayant contribué aux travaux de la commission

Isabelle Cabanne, DGEC

Stéphane Crémel, CGEDD

Silvano Domergue, CGDD

Mathilde Salin, France Stratégie



ANNEXE 3

AUDITIONS

Personnes auditionnées

Les personnes suivantes ont été auditionnées au cours des travaux de la commission, lors de rencontres en comité restreint, lors des plénières ou lors d'ateliers thématiques spécifiques.

Boris Bailly, directeur associé et fondateur, I Care & Consult

Emmanuel Combet, économiste au service Économie et prospective, Ademe

Jean-Pierre Deflandre, professeur au centre Exploration Production d'IFP School, chercheur chef de projet dans le domaine du stockage du CO₂

Quentin Deslot, chargé de mission, département de lutte contre l'effet de serre, ministère de la Transition écologique et solidaire

Luisa Dressler, économiste travaillant au centre de l'administration et des politiques fiscales de l'OCDE

Araceli Fernandez, analyste de technologies de l'énergie, Agence internationale de l'énergie

Gaël Giraud, économiste en chef de l'Agence française de développement, professeur affilié à ESCP Europe en économie et finance, université catholique de Louvain, Belgique, et au Tchad

Christian Gollier, professeur de sciences économiques, directeur général de Toulouse School of Economics

Olivier de Guibert, chef adjoint du département de la lutte contre l'effet de serre, ministère de la Transition écologique et solidaire

Stéphane Hallegatte, économiste senior à la Banque mondiale, groupe sur le changement climatique

Yann Kervinio, chargé de mission Forêts et océans, ministère de la Transition écologique et solidaire

Isabelle Le Nir, directrice du département des techniques d'interprétation, Schlumberger, présidente du Comité géosciences d'EVOLEN

Carole Le Jeune, FNSEA

Cédric Léonard, chef du pôle Modèles de marché et études économiques, RTE

Valérie Quiniou, vice-présidente de l'équipe Climat de Total

Jean Tirole, professeur de sciences économiques, directeur de la Toulouse School of Economics, professeur invité au MIT et directeur d'études cumulant à l'École des hautes études en sciences sociales

Présentations des travaux de la commission

- Conseil national de la transition écologique, le 12 avril 2018
- Comité d'information et d'orientation de la SNBC, le 4 mai 2018
- Rencontre avec les organisations syndicales (CFDT, CFE-CGC, CGT, FO, CFTC), le 19 juin 2018
- Colloque annuel de la French Association of Environmental and Resource Economics (FAERE), le 31 août 2018
- Colloque « Les conditions de l'adhésion à la fiscalité écologique », I4CE, Assemblée nationale, le 2 octobre 2018



ANNEXE 4

BIBLIOGRAPHIE

- Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L. et Hemous D. (2012), « The environment and directed technical change », *American Economic Review*, 102(1), p. 131-166.
- Agence internationale de l'énergie (2012), *Energy Technology Perspectives 2012. Pathways to a Clean Energy System*, Publications de l'AIE, Paris.
- Agence internationale de l'énergie (2017), *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*, Publications de l'AIE, Paris.
- AIE (2017), *World Energy Outlook 2017*, Publications de l'AIE, Paris.
- AIE (2018), *World Energy Outlook 2018*, Publications de l'AIE, Paris.
- AIE, *Sustainable Development Scenario*, Publications de l'AIE, Paris.
- AIE (2017), *Digitalization and Energy*, Publications de l'AIE, Paris.
- Agora Verkehrswende, Agora Energiewende and Frontier Economics (2018), *The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels*.
- Alberola E., Metivier C. et Postic S. (2017), « Panorama mondial des prix du carbone en 2017 », I4CE.
- Ambec S., Cohen M., Elgie S. et Lanoie P. (2013), « The Porter hypothesis at 20: Can environmental regulation enhance innovation and competitiveness? », *Review of Environmental Economics and Policy*, 71(1), p. 2-22.
- Baumstark L. (2011), « La collectivité face à la valeur sociale du carbone : les enjeux d'une valeur tutélaire du carbone », *Reflets et perspectives de la vie économique*, tome I,(1), p. 83-93.
- BEIS (2018), « [Updated short-term traded carbon values](#) »?, UK Department for Business Energy and Industrial Strategy.
- Benveniste H., Boucher O., Guivarch C., Le Treut H. et Criqui P. (2018), « Impacts of nationally determined contributions on 2030 global greenhouse gas emissions: Uncertainty analysis and distribution of emissions », *Environmental Research Letters*, 13(1).
- Boitier B., Callonnec G., Douillard P., Épaulard A., Gherzi F., Masson E. et Mathy S. (2015), « [La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques](#) », *Document de travail*, n° 2015-05, France Stratégie, octobre.

Bueb J., Richieri Hanania L. et Le Clézio A. (2017), « Border adjustment mechanisms: Elements for economic, legal and political analysis », in Arent D., Arndt C., Miller M., Tarp F. et Zinaman O., *The Political Economy Of Clean Energy Transitions*, Oxford University Press.

Bureau D. (2016), « Transition écologique et investissements verts », *Économie & Prévision*, 208-209(1), p. 57-75.

Bureau D. et Gollier C. (2009), « Évaluation des projets publics et développement durable », CEDD, *Références économiques pour le développement durable*, n° 8.

Canadell P., Le Quéré C. et al. (2018), « Carbon emissions will reach 37 billion tons in 2018, a record high », *The Conversation*, 5 décembre.

Canfin P. et Zaouati P. (2018), *Pour la création de France Transition. Des mécanismes de partage de risques pour mobiliser 10 milliards d'euros d'investissements privés dans la transition écologique*, rapport au ministre de la Transition écologique et solidaire et au ministre de l'Économie et des Finances, décembre.

Carbone 4 (2018), *Baromètre de la décarbonation*, novembre.

Cassen C., Guivarch C. et Lecocq F. (2015), « Les cobénéfices des politiques climatiques : un concept opérant pour les négociations climat ? », *Natures Sciences Sociétés*, Supp. 3, p. 41-51.

Chakir R., De Cara S. et Vermont B. (2017), « Price-induced changes in greenhouse gas emissions from agriculture, forestry, and other land use: A spatial panel econometric analysis », *Revue économique*, vol. 68,(3), p. 471-490 .

Chiroleu-Assouline M. (2015), « La fiscalité environnementale en France peut-elle devenir réellement écologique ? État des lieux et conditions d'acceptabilité », *Revue de l'OFCE*, n° 139, p. 131-165.

CITEPA (2015), *Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto*.

CITEPA (2018), *Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto*, Annexe 7.

Commissariat général à la stratégie et à la prospective (2013), *Évaluation socioéconomique des investissements publics*, rapport de la mission présidée par Émile Quinet.

Commission européenne (2015), *The 2015 Ageing Report – Economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013-2060)*, European Economy.

Court V. et Fizaine F. (2017), « Long-term estimates of the energy-return-on-investment (EROI) of coal, oil, and gas global productions », *Ecological Economics*, 138, p. 145-159.

Criqui P. (2018), « [Redéfinir les politiques climatiques](#) », *La Tribune*, 9 décembre.

Dasgupta D., Espagne E., Hourcade J.-C. et al. (2016), « [Did the Paris Agreement plant the seeds of a climate consistent international financial regime?](#) », FEEM, *Note di Lavoro*, n° 50.

Davis S. J., Lewis N. S., Shaner M., Aggarwal S., Arent D., Azevedo I. L., Benson S. M., Bradley T., Brouwer J., Chiang Y.-M., Clack C. T. M., Cohen A., Doig S., Edmonds J., Fennell P., Field C. B., Hannegan B., Hodge B.-M., Hoffert M. I., Ingersoll E., Jaramillo P., Lackner K. S., Mach K. J., Mastrandrea M., Ogden J., Peterson P. F., Sanchez D. L., Sperling D., Stagner J.,

- Trancik J. E., Yang C.-J. et Caldeira K. (2018), « Net-zero emissions energy systems », *Science*, vol. 360, Issue 6396, eaas9793.
- Dechezleprêtre A. (2016), « How to reverse the dangerous decline in low-carbon innovation », *The Conversation*, 24 octobre.
- Depoues V., Granger F. et Leguet B. (2018), « Se situer dans la transition énergétique : un impératif pour toutes les entreprises », *Point Climat*, n° 53, mai, I4CE.
- Dietz S., Gollier C. et Kessler L. (2018), « The climate beta », *Journal of Environmental Economics and Management*, 87, p. 258-274.
- Douillard P., Épaulard A. et Le Hir B. (2016), « [Modèles macroéconomiques et transition énergétique](#) », *La Note d'analyse*, n° 43, France Stratégie, février.
- European Environment Agency (2018), [Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2016 and inventory report](#), Submission to the UNFCCC Secretariat.
- Évaluation des grands projets d'investissements publics, annexe au projet de loi de finances pour 2018.
- Forchungsvereinigung Verbrennungskraft-maschinen e V. (2016), *Renewables in Transport 2050*
- Centre d'analyse stratégique (2008), [La Valeur tutélaire du carbone](#), rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française.
- Centre d'analyse stratégique (2011), [Le calcul du risque dans les investissements publics](#), rapport de la mission présidée par Christian Gollier.
- France Stratégie (2017), [Guide de l'évaluation socioéconomique des investissements publics](#), rédigé sous l'autorité du comité d'experts des méthodes d'évaluation socioéconomique des investissements publics présidé par Robert Guesnerie.
- GIEC (2014), *Climate Change 2014, Synthesis Report: Summary for Policymakers*, Three Working Groups of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- GIEC (2018), [Global Warming of 1.5 °C: Summary for Policymakers](#), Working Group I Technical Support Unit.
- GIEC (2018), [Special Report on Global Warming of 1.5 °C](#).
- Grandjean A. et Canfin P. (2015), [Mobiliser les financements pour le climat – Une feuille de route pour une économie décarbonisée](#), rapport de la commission au président de la République, juin.
- Grandjean A. (2017), « [Les “vrais” coûts de l'énergie](#) », Chroniques de l'anthropocène.
- Grandjean A., Ledoux R. et Daunay J. (2018), « Décarboner le bâtiment, sans oublier ses émissions indirectes », *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 90(2), p. 38-40.
- Guivarch C. et Rogelj J. (2017), « [Carbon price variations in 2 °C scenarios explored](#) », background paper for the Commission on Carbon Pricing Leadership.
- Hope C., Anderson J. et Wenman P. (1993), « Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE mode », *Energy Policy* 21 (3), p. 327-338.
- Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases (2016), *Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis*, United States Government.

Lecocq F. (2006), « Les marchés carbone dans le monde », *Revue d'économie financière*, (83), p. 13-30.

Marcu M., Alberola E., Caneill J.-Y., Mazzoni M., Schleicher S. P., Stoefs W., Vailles C. et Vangenechten D. (2018), *Emissions Trading Schemes – 2018 State of the EU ETS Report*, ERCST, Wegener Center, Nomisma Energia, I4CE and Ecoact.

Matthey A. et Bünger B. (2018), *Methodological Convention 3.0 for the Assessment of Environmental Costs, Costs Rates*, Agence allemande de l'environnement.

Ministère de la Transition écologique et solidaire (2018), *Suivi de la stratégie nationale bas-carbone*, janvier.

Nordhaus W. D. (2017), [DICE/RICE models](#), Yale Economics, octobre

Nordhaus W. D. (1993), « Reflections on the economics of climate change », *Journal of Economic Perspectives*, 7 (4), p. 11-25.

OCDE (2014), *Prix effectifs du carbone*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2015), *Aligner les politiques publiques au service de la transition vers une économie bas carbone*, Réunion du Conseil au niveau des ministres, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2017), *Investing in Climate, Investing in Growth*, Éditions OCDE, Paris.

OCDE (2018), *Effective Carbon Rates 2018: Pricing Carbon Emissions Through Taxes and Emissions Trading*, Éditions OCDE, Paris.

Pellerin S. *et al.* (2017), « Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture », *Environmental Science & Policy*, 77, p. 130-139.

Perissin Fabert B. et Foussard A. (2016), *Trajectoires de transitions bas carbone en France au moindre coût*, ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.

Peyrol D. et Bureau D. (2018), *Comment construire la fiscalité environnementale pour le quinquennat et après 2022*, rapport du comité pour l'économie verte.

Pigou A. C. (1932), *The Economics of Welfare*, Macmillan.

Pindyck R. (2017), « The use and misuse of models for climate policy », *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 11(1), p. 100-114.

Quirion P., Rozenberg J., Sassi O. et Vogt-Schilb A. (2011), « How CO₂ capture and storage can mitigate carbon leakage ».

Rubin E. S., Azevedo Inês I. M. L., Jaramillo P. et Yeh S. (2015), « A review of learning rates for electricity supply technologies », *Energy Policy*, n° 86, p. 198-218.

Stern N. (2006), *Stern Review: the Economics of Climate Change*, United Kingdom.

Stiglitz J. E., Stern N., Duan M., Edenhofer O., Giraud G. *et al.* (2017), *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*, Carbon Pricing Leadership Coalition.

The New Climate Economy (2018), *Unlocking the Inclusive Growth Story of the 21st Century: Accelerating Climate Action in Urgent Time*, The Global Commission on the Economy and the Climate, Washington DC.

The Shift Project (2018), *Pour une sobriété numérique*, rapport du groupe de travail réalisé par Hugues Ferrebeuf.

Tirole J. (2009), *Politique climatique : une nouvelle architecture internationale*, rapport n° 87 pour le Conseil d'analyse économique.

Tirole J. (2009), « [Some economics of global warming](#) », Toulouse School of Economics.

Tol R. S. J. (1996), « The Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution », in K. A. Miller et R. K. Parkin (eds.), *An Institute on the Economics of the Climate Resource*, University Corporation for Atmospheric Research, Boulder, p. 471-496.

Tvinnereim E. et Mehling M. (2018), « [Carbon pricing and deep decarbonisation](#) », *Energy Policy*, vol. 121, p. 185-189.

U.S Environmental Protection Agency (2017), *Regulatory Impact Analysis for the Review of the Clean Power Plan: Proposal*.

Vogt-Schilb A., Hallegatte S. et de Gouvello C. (2014), « Long-term mitigation strategies and marginal abatement cost curves: A case study on Brazil », *Policy Research Working Paper*, n° WPS 6808, Washington, DC, World Bank Group.



Directeur de la publication

Gilles de Margerie, commissaire général

Secrétaires de rédaction

Olivier de Broca, Sylvie Chasseloup

Contact presse

Jean-Michel Roullé, directeur du service Édition/Communication/Événements

01 42 75 61 37, jean-michel.roulle@strategie.gouv.fr

RETROUVEZ
LES DERNIÈRES ACTUALITÉS
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@Strategie_Gouv](https://twitter.com/Strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[@francestrategie_](https://www.instagram.com/francestrategie_)

Les opinions exprimées dans ce rapport engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement.



FRANCE STRATÉGIE



France Stratégie est un organisme d'études et de prospective, d'évaluation des politiques publiques et de propositions placé auprès du Premier ministre. Lieu de débat et de concertation, France Stratégie s'attache à dialoguer avec les partenaires sociaux et la société civile pour enrichir ses analyses et affiner ses propositions. Elle donne à ses travaux une perspective européenne et internationale et prend en compte leur dimension territoriale.