

# 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>e 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

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>9</b>
<b>DÉMARCHE, RÉSULTATS, USAGES : MESSAGES CLÉS ET RECOMMANDATIONS</b> .....	<b>15</b>
<b>LES CHIFFRES CLÉS</b> .....	<b>31</b>
<b>GLOSSAIRE</b> .....	<b>33</b>
<b>CHAPITRE 1 – LE CONTEXTE MONDIAL : CE QUI A CHANGÉ DEPUIS DIX ANS ...</b>	<b>35</b>
<b>1. Le monde n'est pas sur la bonne trajectoire</b> .....	<b>36</b>
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
<b>2. Le champ des opportunités technologiques s'est élargi</b> .....	<b>45</b>
2.1. Un avenir technologique plus prometteur .....	45
2.2. Des incertitudes importantes sur les coûts des technologies à l'horizon 2050 .....	48
<b>3. L'économie du climat fournit le cadre d'une atténuation efficace du changement climatique</b> .....	<b>50</b>
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
<b>4. Le contexte institutionnel est plus porteur, même si la coopération internationale reste insuffisante</b> .....	<b>57</b>
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
<b>CHAPITRE 2 – LA DÉMARCHE COÛTS-EFFICACITÉ.....</b>	<b>65</b>
<b>1. L'approche est fondée sur les engagements climatiques de la France .....</b>	<b>65</b>
1.1. L'objectif « zéro émissions nettes » .....	66
1.2. L'horizon 2050 .....	67
1.3. Le découplage entre émissions et activités humaines.....	67
<b>2. La démarche de la commission s'appuie sur plusieurs instruments de prospective .....</b>	<b>72</b>
<b>3. Le cahier des charges se fonde sur un jeu d'hypothèses raisonnables .....</b>	<b>73</b>
3.1. Les caractéristiques de la neutralité carbone prises en compte par la commission .....	73
3.2. L'horizon de la simulation.....	75
<b>4. Le calcul d'une trajectoire pour la valeur du carbone repose sur des travaux originaux de modélisation.....</b>	<b>77</b>
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
<b>5. Le scénario de référence.....</b>	<b>87</b>
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
<b>CHAPITRE 3 – LES RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS EXERCICES DE PROSPECTIVE.....</b>	<b>93</b>
<b>1. Toutes les approches convergent vers une revalorisation substantielle de la valeur de l'action pour le climat .....</b>	<b>93</b>
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
<b>2. L'investissement constitue l'enjeu principal d'une transition réussie vers la neutralité carbone .....</b>	<b>111</b>
2.1. Les évolutions sectorielles.....	111
2.2. Les grands leviers de convergence vers la neutralité carbone.....	115
<b>CHAPITRE 4 – LA VALEUR DE L'ACTION POUR LE CLIMAT .....</b>	<b>121</b>
<b>1. La trajectoire proposée s'ancre sur une valeur de 250 € en 2030 .....</b>	<b>121</b>
1.1. Une trajectoire unique pour l'ensemble de l'économie.....	121
1.2. Une trajectoire pluriannuelle ancrée sur une valeur de 250 € <sub>2018</sub> /tCO <sub>2</sub> e en 2030 .....	122
<b>2. La trajectoire est revue à la hausse, en ligne avec les travaux internationaux de modélisation les plus récents .....</b>	<b>124</b>
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
<b>3. Une coopération internationale plus intense permettrait de réduire les coûts d'abattement .....</b>	<b>127</b>
3.1. Les incertitudes technologiques et comportementales.....	127
3.2. La valeur de l'action internationale .....	128
<b>4. La valorisation des actions de décarbonation .....</b>	<b>129</b>
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
<b>CHAPITRE 5 – UN RÉFÉRENTIEL POUR VALORISER LES IMPACTS CLIMATIQUES DES PROJETS D'INVESTISSEMENT PUBLICS .....</b>	<b>137</b>
<b>1. L'évaluation socioéconomique des projets doit être étendue et renforcée....</b>	<b>138</b>
1.1. Toutes les personnes publiques sont concernées .....	138
1.2. Tous les domaines de l'action publique sont concernés .....	141

<b>2. L'ensemble du cadre d'évaluation doit être rénové à l'aune de l'objectif de neutralité carbone.....</b>	<b>143</b>
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
<b>CHAPITRE 6 – UNE BOUSSOLE POUR L'INVESTISSEMENT ET L'ACTION .....</b>	<b>151</b>
<b>1. La valeur de l'action pour le climat permet de préciser des actions sectorielles de décarbonation utiles à la collectivité.....</b>	<b>152</b>
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
<b>2. La valeur privée des actions doit être rapprochée de leur valeur socioéconomique .....</b>	<b>163</b>
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
<b>3. Synthèse : le mode d'emploi de la valeur de l'action pour le climat .....</b>	<b>169</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>171</b>
<b>ANNEXES</b>	
<b>Annexe 1 – Lettre de mission .....</b>	<b>175</b>
<b>Annexe 2 – Membres de la commission .....</b>	<b>177</b>
<b>Annexe 3 – Auditions .....</b>	<b>179</b>
<b>Annexe 4 – Bibliographie .....</b>	<b>181</b>



## 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)<sup>1</sup>, 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'administration<sup>2</sup>. 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'économie<sup>3</sup>.

## **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<sup>e</sup> 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.

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> La liste des membres de la commission figure en annexe 2.

<sup>3</sup> 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 €<sub>2018</sub> la tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e), soit un relèvement substantiel par rapport à la cible de 100 €<sub>2008</sub> 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 €<sub>2018</sub>/tonne de CO<sub>2</sub>e.

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 €<sub>2018</sub> à l'horizon 2030, cela veut dire que toutes les actions qui coûtent moins de 250 €<sub>2018</sub> la tonne de CO<sub>2</sub>e 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'OCDE<sup>1</sup>, du New Climate Economy Project<sup>2</sup> et de la Commission européenne<sup>3</sup>. 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 CO<sub>2</sub>), 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 ;

---

<sup>1</sup> OCDE (2017), *Investing in Climate, Investing in Growth*, éditions OCDE, Paris.

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

<sup>3</sup> 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 Climat<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e).

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 CO<sub>2</sub>e 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 CO<sub>2</sub>e évitée à prendre en compte dans les décisions de l'ensemble des acteurs économiques pour que la France atteigne la neutralité carbone<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>e 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

---

<sup>1</sup> 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 mondiales<sup>1</sup>.

### ***L'horizon ensuite***

La France se fixe un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, sans attendre la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> 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

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>e, 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'éémousse 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 CO<sub>2</sub>e 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 « verdir » 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 CO<sub>2</sub>e 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 €<sub>2018</sub> en 2030.

Cette valeur est significativement plus élevée que celle du référentiel actuel issu des propositions de la commission en 2008 (100 €<sub>2008</sub>, 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 €<sub>2018</sub> en 2040 et 775 €<sub>2018</sub> 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.

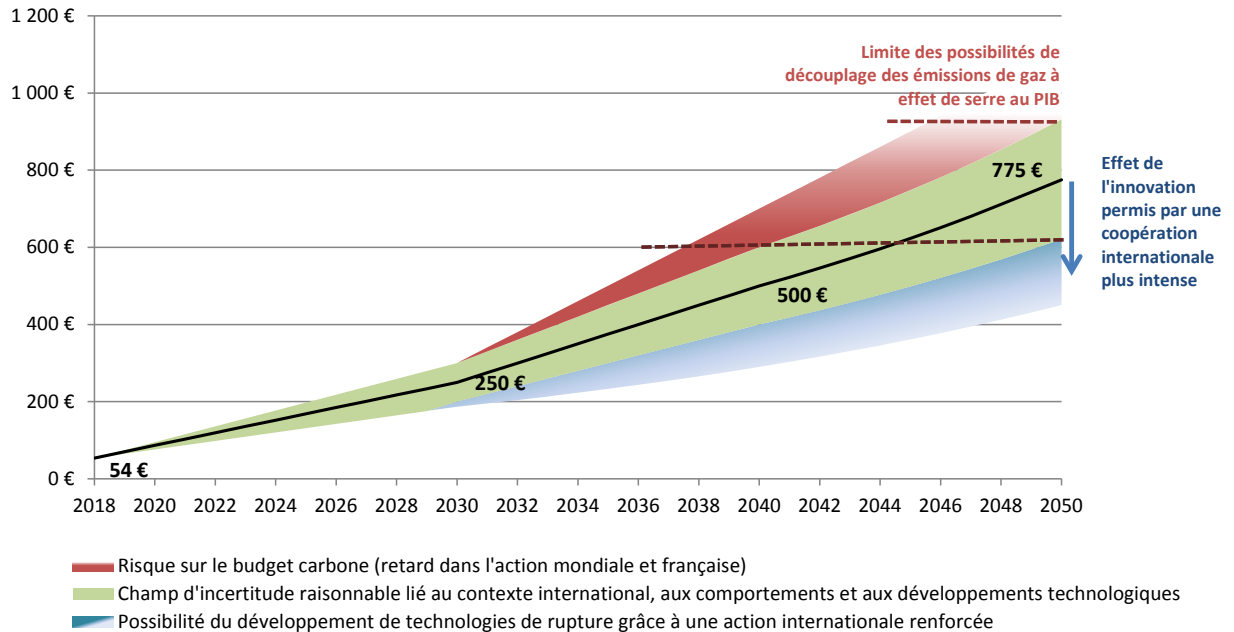
L'incertitude sur les coûts des technologies d'atténuation (comme sur les dommages du changement climatique) renforce la nécessité d'une approche séquentielle où les politiques sont progressivement révisées au fur et à mesure que de l'information supplémentaire devient disponible. Cela a trois conséquences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

- 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 CO<sub>2</sub>. Les émissions de gaz à effet de serre portent en effet pour un quart d’entre elles sur les gaz autres que le CO<sub>2</sub>. 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 européenne<sup>1</sup>, 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.

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>e 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 CO<sub>2</sub>e 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-Stiglitz<sup>1</sup>, cette commission considère qu'il faut, en amont des mesures particulières, veiller au bon alignement des politiques publiques sur

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>e 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 GtCO<sub>2</sub>e ;
- permettant de maintenir le réchauffement climatique sous les 1,5 °C avec une probabilité de 66 % : 570 GtCO<sub>2</sub>e.

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 MtCO<sub>2</sub>e (millions de tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent)
- Soit 7 tCO<sub>2</sub>e 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 CO<sub>2</sub> 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 MtCO<sub>2</sub>e.

*Source : Direction générale de l'énergie et du climat*

## **La proposition de valeur de l'action pour le climat**

- 2018 : 54 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e
- 2020 : 87 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e
- 2030 : 250 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e
- 2040 : 500 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e
- 2050 : 775 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e

*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 CO<sub>2</sub>e. 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 2008<sup>1</sup>, 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 °C<sup>2</sup>.

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 CO<sub>2</sub> ;
- 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

---

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

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

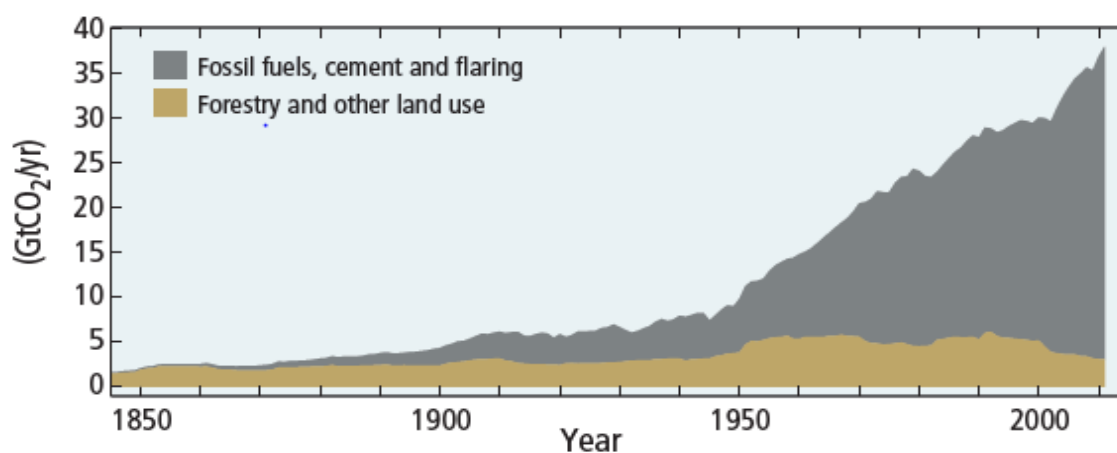
depuis la COP15 à Copenhague, l'Accord de Paris de 2015 a été l'occasion de renouveler l'engagement des 196 pays signataires à contenir la hausse des températures à moins de 2 °C.

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 CO<sub>2</sub> par an et émissions de CO<sub>2</sub> cumulées par période



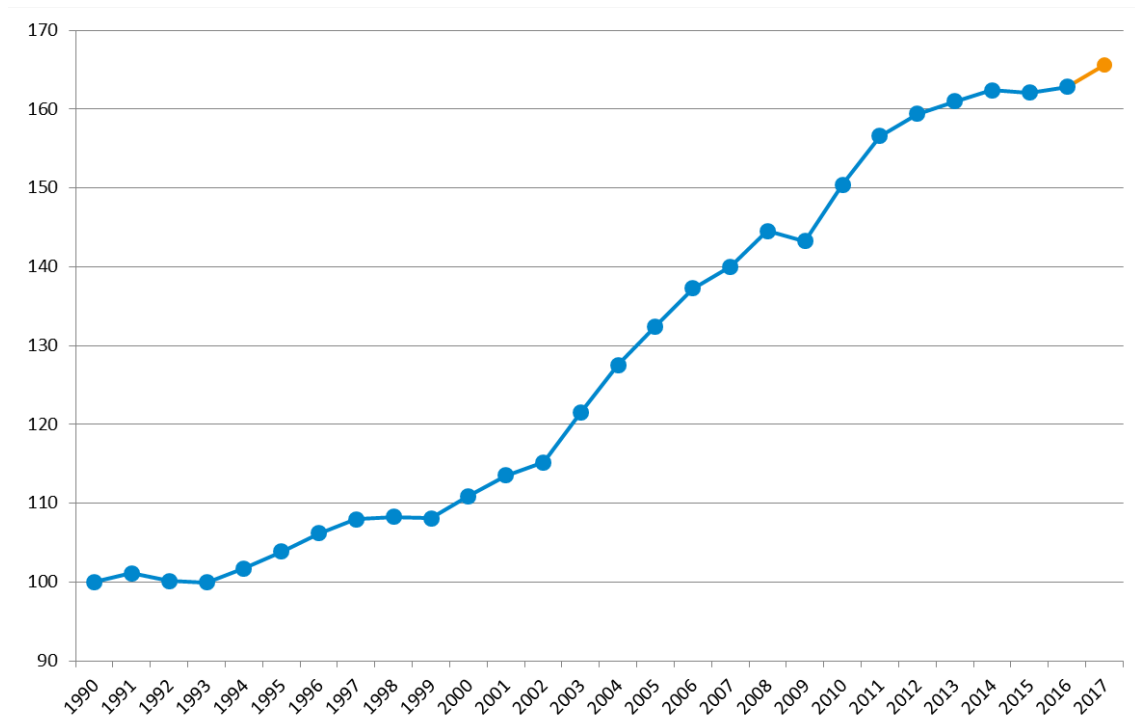
Lecture : en gris sont représentées les émissions liées à la combustion d'énergie fossile, aux activités de cimenterie et au torçage ; en brun figurent les émissions liées aux activités de foresterie et autres utilisations des sols.

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 2007-2008<sup>1</sup>. 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

<sup>1</sup> 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 »<sup>1</sup>.

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. »<sup>2</sup> 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 (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>). Les trois quarts des émissions de GES sont des émissions de CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> (t CO<sub>2</sub>e), qui représente la masse de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>e.

<sup>1</sup> « 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*.

<sup>2</sup> « 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 <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Gaz fluorés			
					HFC	PFC	SF <sub>6</sub>	NF <sub>3</sub>
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 CO<sub>2</sub>.

\* 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 CO<sub>2</sub> 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](http://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](http://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](http://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/effet-de-serre/perfluorocarbures)

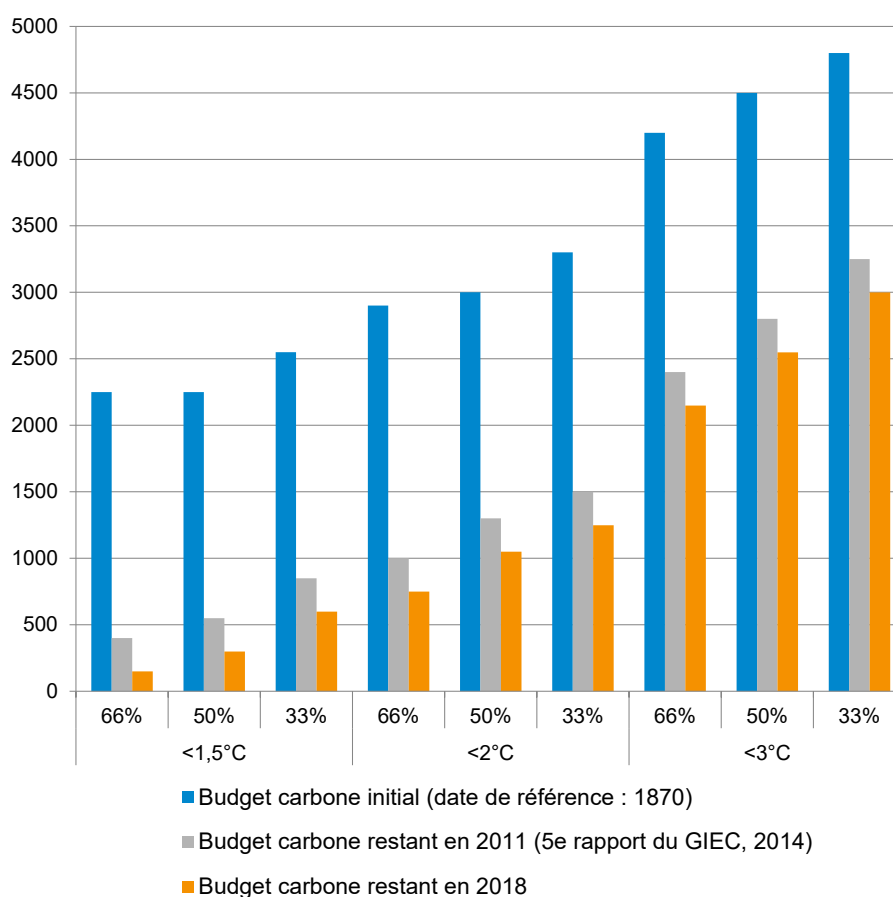
## 1.2. Un budget carbone mondial en épuisement rapide

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 degrés<sup>1</sup> ;
- 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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).

---

<sup>1</sup> 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 CO<sup>2</sup> (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 <sub>2</sub> /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 rapports<sup>1</sup>.

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

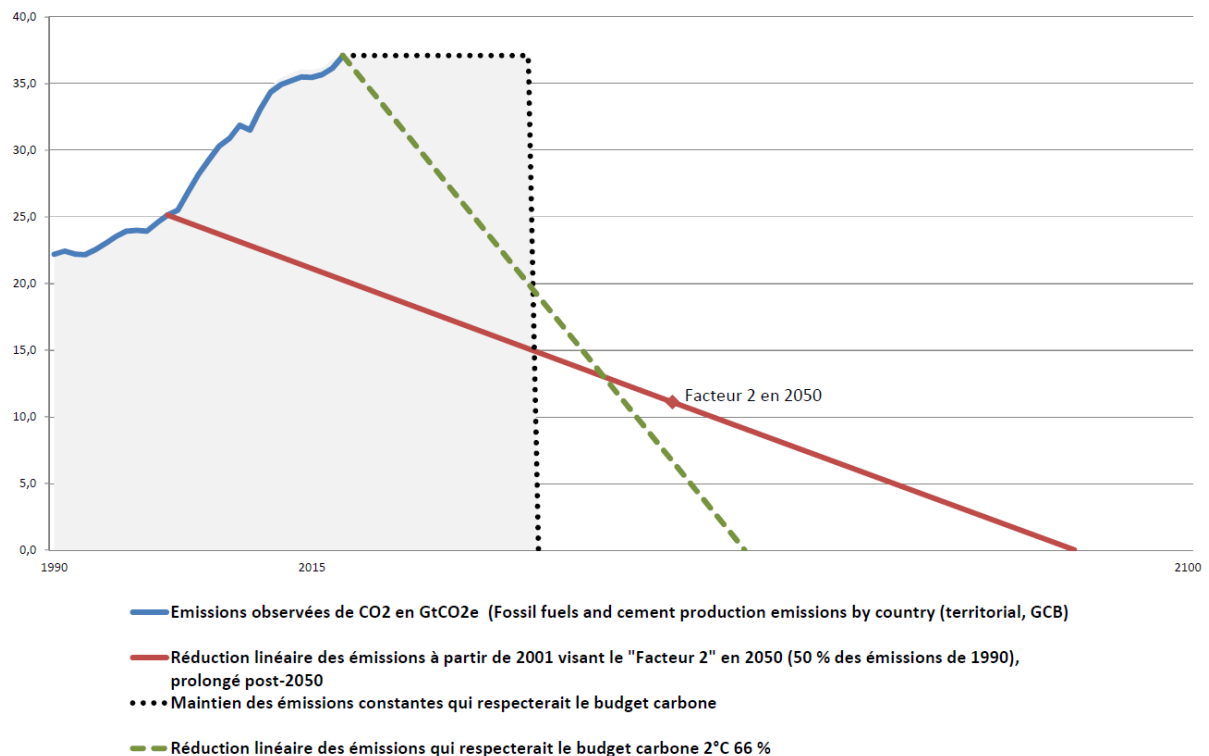
Cible du réchauffement anthropique	AR5						SR 1.5					
	<1,5 °C			<2 °C			<1,5 °C			<2 °C		
Probabilité de respect des objectifs de hausse des températures	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %	66 %	50 %	33 %
Budget carbone restant en 2018	153	303	603	753	1 053	1253	420	580	840	1 170	1 500	2 030

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*

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> (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 BioCSC<sup>1</sup> qui permet la réalisation d'émissions négatives<sup>2</sup> :
  - la solution BioCSC permet des émissions nettes négatives de CO<sub>2</sub>. Les émissions de CO<sub>2</sub> 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.

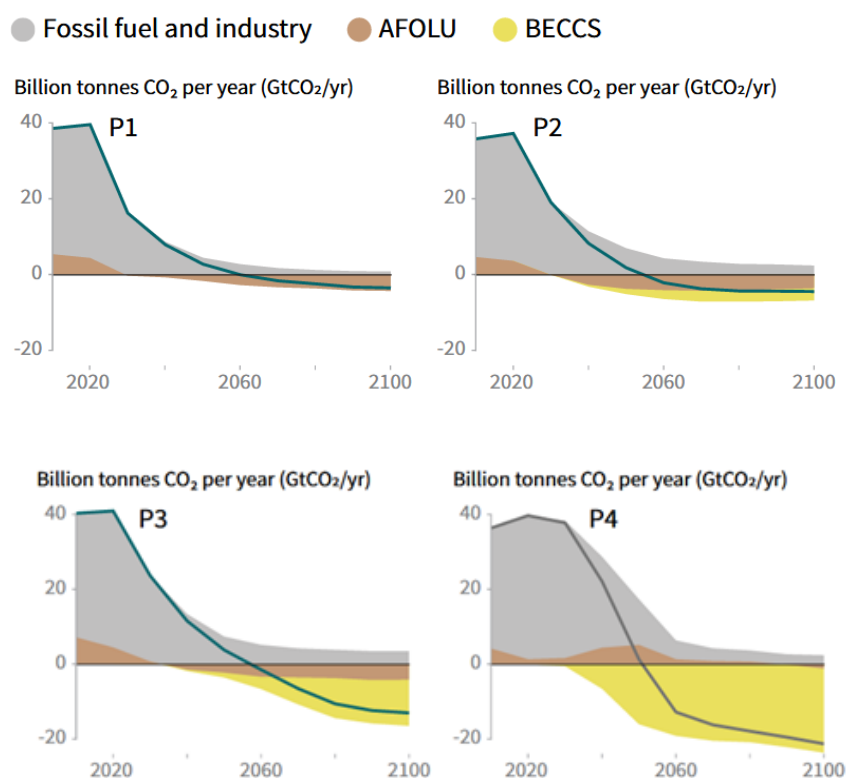
Seuls les deux premiers scénarios n'impliquent pas des situations de dépassement temporaire de la cible (« *overshooting* »), dont la correction ultérieure est conditionnée au développement de technologies CSC.

---

<sup>1</sup> La BioCSC est l'utilisation de la biomasse comme intrant énergétique et dont les émissions CO<sub>2</sub> sont capturées et séquestrées.

<sup>2</sup> 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*<sup>1</sup>), met en évidence le

<sup>1</sup> [www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo), [www.iea.org/etp](http://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 exemple<sup>1</sup>.

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 CO<sub>2</sub>, 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

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 technologies<sup>1</sup>. 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 technologies<sup>2</sup>. « 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

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub> : Complément 14, « Valeur tutélaire du carbone : quelques considérations technico-économiques », par François Dassa et Jean-Michel Trochet.

<sup>2</sup> 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'hui<sup>1</sup>.

## 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 prix<sup>2</sup> – 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 CO<sub>2</sub> (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 CO<sub>2</sub> 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 séquestration<sup>3</sup>.

---

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

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

<sup>3</sup> 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 métaux<sup>1</sup> 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 production<sup>2</sup>. 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 »<sup>3</sup>. 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,

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> 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 CO<sub>2</sub>) 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 prospective<sup>1</sup> :

- 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 consensus<sup>2</sup>. Les travaux du GIEC ont largement consolidé des risques catastrophiques<sup>3</sup>, 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 Cambridge<sup>4</sup>, et utilisé notamment pour le rapport Stern<sup>5</sup>, ou réalisées avec des modèles simples très agrégés comme le modèle DICE développé par William Nordhaus<sup>6</sup> 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.

---

<sup>1</sup> Voir l'encadré 2.

<sup>2</sup> 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.

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

<sup>4</sup> 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.

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

<sup>6</sup> 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.

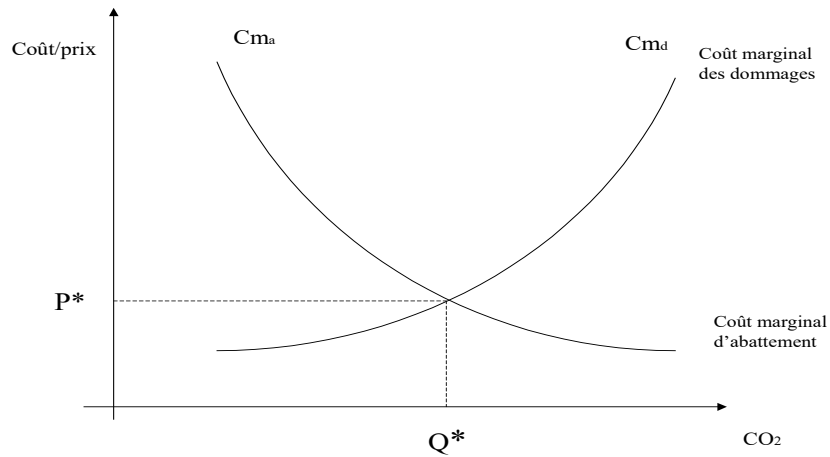
#### Encadré 2 – L'approche coûts-bénéfices et l'approche coûts-efficacité

##### *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 CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et le coût marginal de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub> est importante, plus le coût des dommages résultant d'une émission supplémentaire augmente ; plus on diminue la concentration de CO<sub>2</sub>, 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

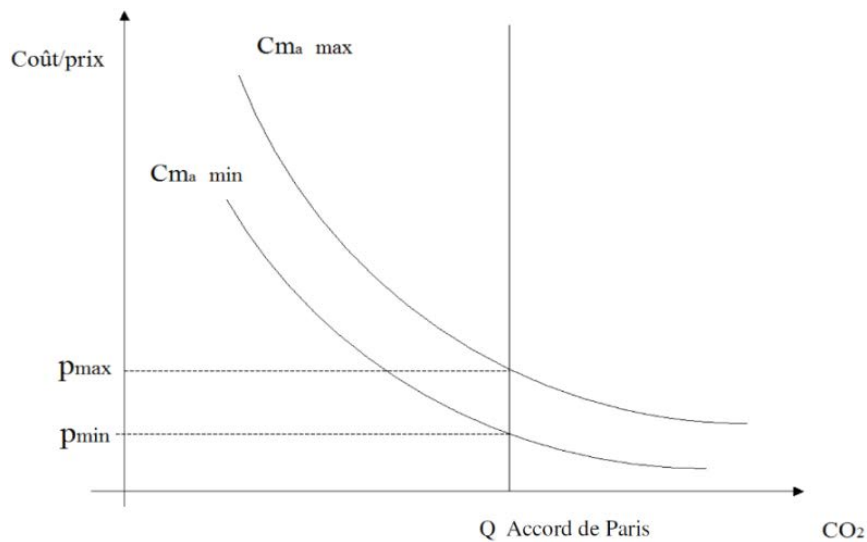


Source : France Stratégie

### 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 CO<sub>2</sub> aujourd'hui ou dans un an, ce qui implique que la valeur de la tonne de CO<sub>2</sub> 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 importance<sup>1</sup>. 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 »<sup>2</sup> d'un programme de

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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 climat<sup>1</sup>.

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<sup>e</sup> 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.

<sup>1</sup> 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 carbone<sup>1</sup> 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

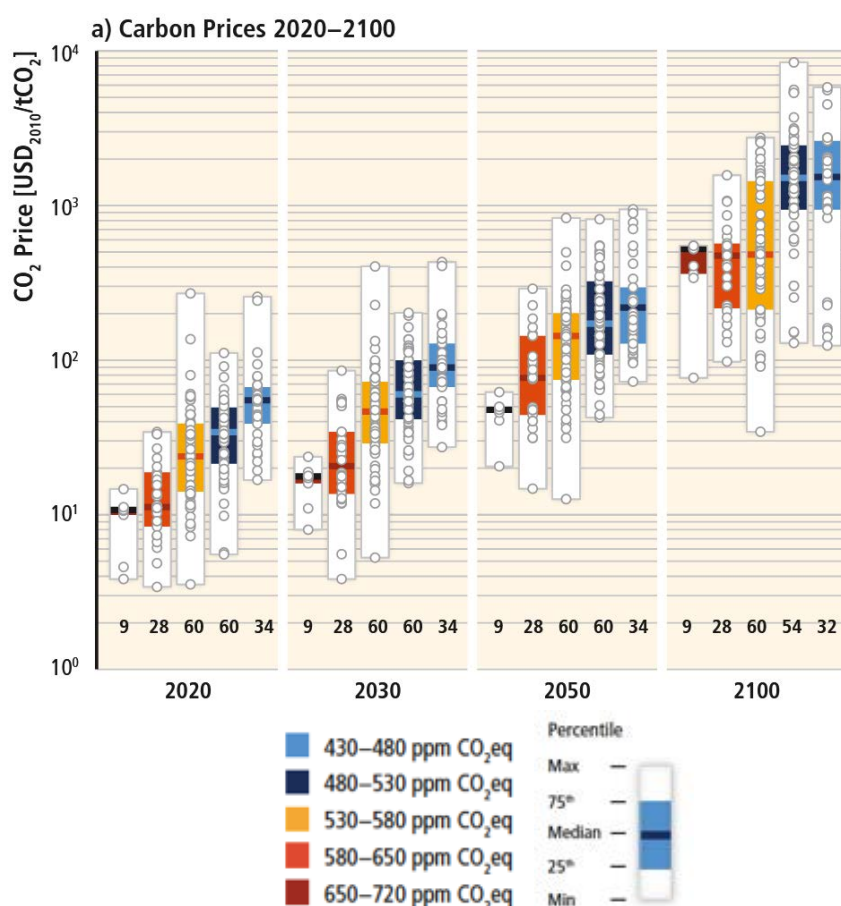
---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub> (en \$<sub>2010</sub>) se situant :

- à l'horizon 2030, autour de 12 \$/tCO<sub>2</sub>e pour un scénario 650-720ppm<sup>1</sup> et de 100 \$/tCO<sub>2</sub>e pour un scénario 430-480ppm<sup>2</sup> ;
- à l'horizon 2050, autour de 15 \$/tCO<sub>2</sub>e pour un scénario 650-720ppm et de 200 \$/tCO<sub>2</sub>e 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

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

<sup>2</sup> 430-480ppm (« parties par million ») CO<sub>2</sub>e 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 GIEC<sup>1</sup> 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 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>	45-1050 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>	120-1100 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>	175-2340 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>
Inférieur à 1,5 °C (Below-1.5 °C)	135-6500 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>	245-14300 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>	420-19300 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>	690-30100 \$ <sub>2010</sub> /tCO <sub>2e</sub>

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 C<sup>2</sup>. Elle conduit à une valeur carbone de 70 £<sub>2007</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2030 et de 220 £<sub>2007</sub>/tCO<sub>2e</sub> 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 publication<sup>3</sup>, à une valeur de 4,56 £<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> pour 2020 et de 79,43 £/tCO<sub>2e</sub> pour 2030.

Aux États-Unis, l'EPA (Environmental Protection Agency), ainsi que d'autres agences fédérales, utilisent un coût social du CO<sub>2</sub> pour valoriser les impacts climatiques des

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

<sup>2</sup> 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.

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

politiques mises en œuvre<sup>1</sup>. Un groupe de travail inter-agences<sup>2</sup> est chargé depuis 2009 d'harmoniser cette valeur et, depuis 2016, de l'actualiser en collaboration avec un comité issu de l'Académie des Sciences<sup>3</sup>. 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 Tol<sup>4</sup>) 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<sup>e</sup> centile de la distribution de la valeur sociale du CO<sub>2</sub> est aussi mentionnée. Les valeurs obtenues sont présentées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 5 – Coût social du carbone, 2015-2050 (en \$<sub>2007</sub> par tonne de CO<sub>2</sub>)**

Année	Taux d'actualisation et statistiques			
	Moyenne 5 %	Moyenne 3 %	Moyenne 2,5 %	Impact élevé (3 % 95 <sup>e</sup> 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*

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

<sup>2</sup> IWG, pour Interagency Working Group.

<sup>3</sup> National Academies of Sciences, Engineering and Medicine.

<sup>4</sup> 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 \$<sub>2007</sub> (pour un taux d'actualisation de 7 %) à 5,6 \$<sub>2007</sub> (pour un taux d'actualisation de 3 %) pour 2020<sup>1</sup>.

En Allemagne, une étude de l'Agence allemande pour l'environnement (UBA)<sup>2</sup> 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 (€<sub>2016</sub>/tCO<sub>2</sub>e)**

	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 carbone<sup>3</sup>. 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 \$/tCO<sub>2</sub> à l'horizon 2020 et entre 50 et 100 \$/tCO<sub>2</sub> à l'horizon 2030.

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

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

<sup>3</sup> 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'OCDE<sup>1</sup> 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 » calculé<sup>2</sup> 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 CO<sub>2</sub>, 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 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2</sub>e)**

	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 €

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

<sup>2</sup> Deux niveaux de référence sont considérés : 30 €/tCO<sub>2</sub>, ce qui est une estimation basse des coûts du carbone aujourd'hui ; et 60 €/tCO<sub>2</sub>, 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 <sub>2e</sub> (1,5 °C plus improbable que probable, 2 °C probable)  650-720ppm CO <sub>2e</sub> (2 °C improbable, 3 °C plus probable qu'improbable)	Monde				650-720ppm 11 €  430-480ppm 95 € <sup>1</sup>	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 €<sub>2017</sub> de monnaies étrangères d'une année différente de 2017 a été réalisée via une conversion en monnaie étrangère 2017 puis en €<sub>2017</sub>. Les données utilisées ont été consultées le 8 octobre 2018.

Source : France Stratégie

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub>e 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 CO<sub>2</sub>e 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<sup>e</sup> 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 carbone<sup>1</sup> 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 ;

---

<sup>1</sup> 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 ».

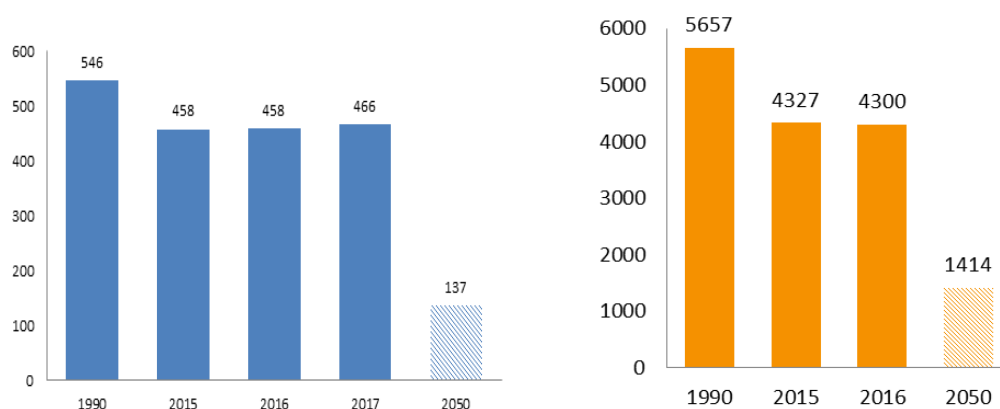
### Encadré 3 – Les engagements français, du facteur 4 à la neutralité carbone

#### 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.

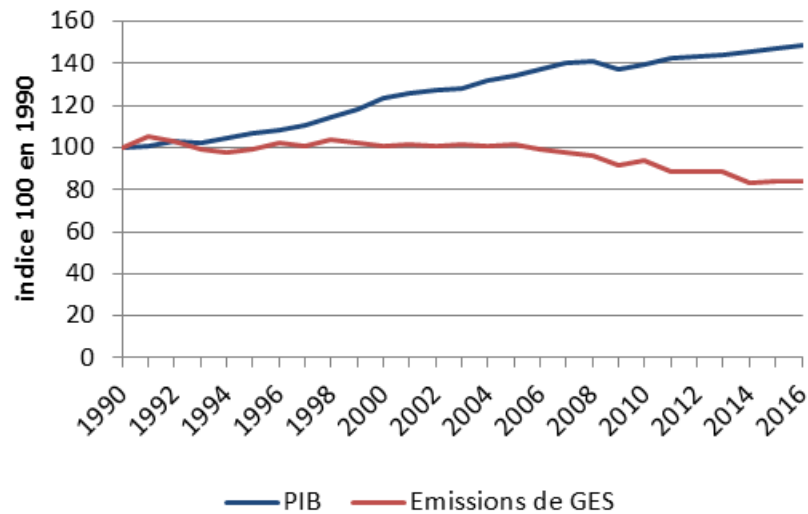
Entre 1990 et 2015, la France a réduit ses émissions de GES de 15 % et l'UE de presque un quart. Dans le même temps, le PIB de la France a crû de 47 %. Cela est bien sûr à mettre en regard du phénomène de désindustrialisation et de l'augmentation du prix des énergies fossiles, mais c'est aussi le témoignage 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 CO<sub>2</sub> (MtCO<sub>2</sub>e) 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 2050<sup>1</sup>.

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

<sup>1</sup> 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, CCU<sup>1</sup>), 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<sub>2e</sub> en 2016 (contre 29 MtCO<sub>2e</sub> en 1990). Il est retenu comme hypothèse que leur capacité de séquestration pourra atteindre 75 à 95 MtCO<sub>2e</sub> en 2050. À ces puits naturels s'ajouteraient 20 MtCO<sub>2e</sub> 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<sub>2e</sub> à 115 MtCO<sub>2e</sub> en 2050.

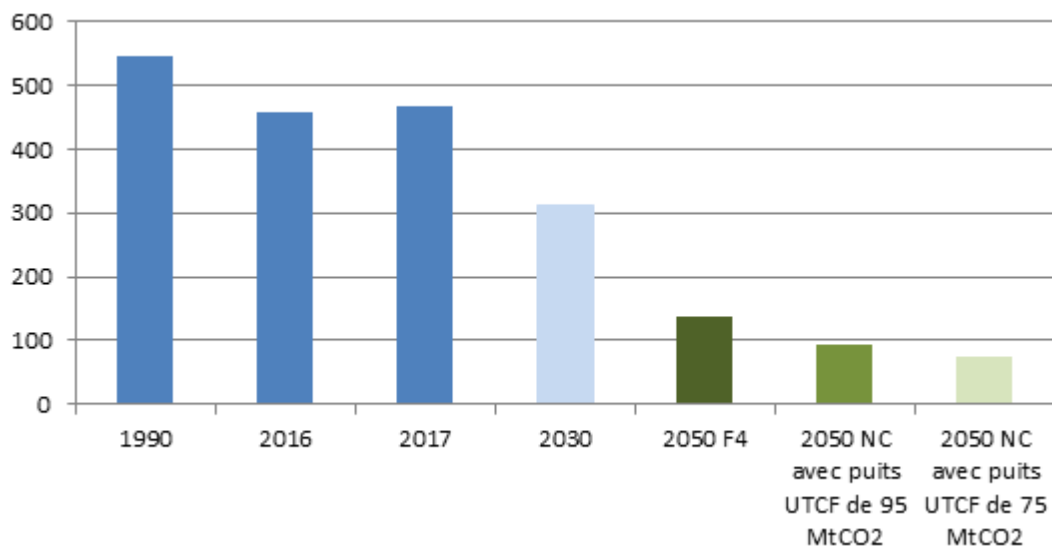
Au total, le scénario neutralité carbone représente un *facteur 6 à 7* selon les potentiels réels de puits.

---

<sup>1</sup> Il s'agit d'une technologie d'atténuation du changement climatique en captant le CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.



Figure 11 – Émissions françaises et cibles d'émissions



Lecture : le « scénario 95 » fait référence à un puits agricole et forestier de 95 MtCO<sub>2</sub>e auquel s'ajoutent 20 MtCO<sub>2</sub>e de CSC. Dans chacun des scénarios, l'hypothèse CSC retenue est de 20 MtCO<sub>2</sub>e.

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

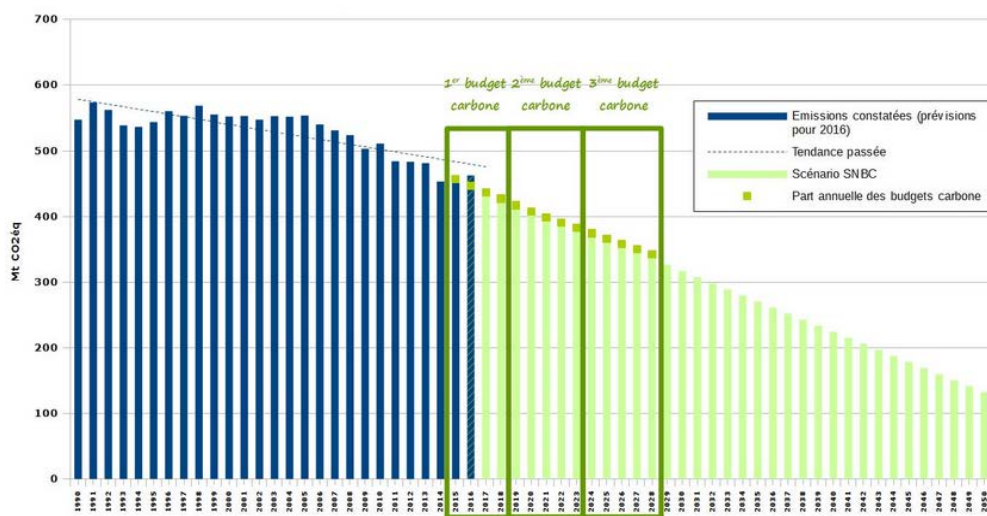
### Les budgets carbone français

Les budgets carbone français<sup>1</sup>, 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'activité<sup>2</sup>. Le premier budget carbone, fixé à 442 MtCO<sub>2</sub>e, est décliné de la façon indicative suivante : 127 MtCO<sub>2</sub>e pour les transports, 76 MtCO<sub>2</sub>e pour les bâtiments, 86 MtCO<sub>2</sub>e pour l'agriculture, 80 MtCO<sub>2</sub>e pour l'industrie, 55 MtCO<sub>2</sub>e pour la production d'énergie et 18 MtCO<sub>2</sub>e pour les déchets.

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

<sup>2</sup> 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](http://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 (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), composés fluorés (HFC, PFC, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>). 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 CO<sub>2</sub> (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 cobénéfices<sup>1</sup>. Ces derniers sont définis comme les avantages collatéraux en termes économiques, sociaux et

<sup>1</sup> 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.).

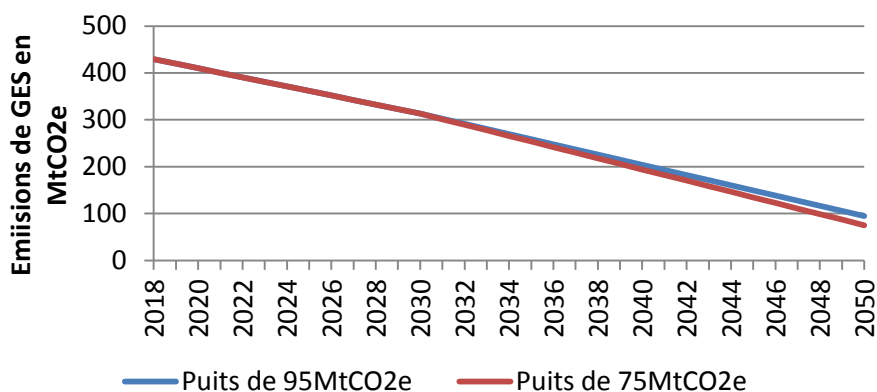
### 3.2. L'horizon de la simulation

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'ajustement<sup>1</sup> 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

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>e 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 CO<sub>2</sub>e 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 Nordhaus<sup>1</sup> 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.

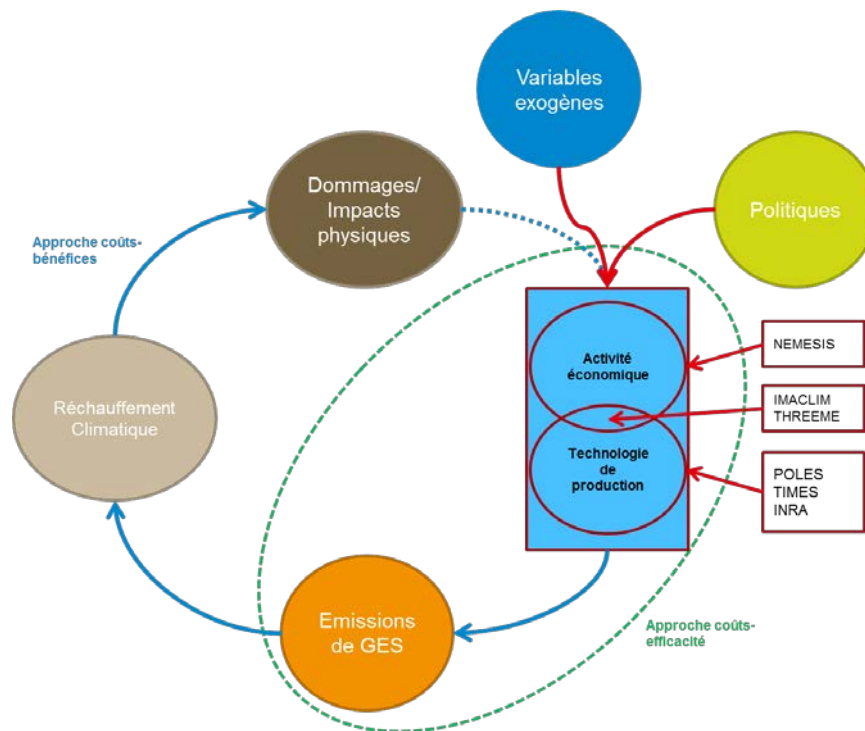
L'encadré 5 page suivante présente très brièvement les modèles mobilisés par la commission de façon individuelle, ceux-ci étant décrits plus en détail dans les Compléments au rapport.

---

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



Figure 14 – Schéma de modélisation



Source : France Stratégie, représentation des auteurs

### Encadré 5 – Présentation des modèles utilisés<sup>1</sup>

#### *Les modèles technico-économiques*

TIMES-France<sup>2</sup> est un modèle d'optimisation inter-temporelle du système énergétique français piloté par la demande : à partir d'une représentation des secteurs de l'ensemble de la filière énergétique, son objectif est de déterminer un choix de technologies qui satisfasse la demande tout en minimisant le coût total actualisé du système énergétique français sur un horizon certain tout en prenant en compte la contrainte d'émissions de gaz à effet de serre sur le système énergétique. Le coût total intègre dans ce modèle à la fois des coûts d'investissement, des coûts de fonctionnement et d'opération et maintenance et la valeur de rachat des équipements à la fin de l'horizon du modèle.

<sup>1</sup> Les cinq modèles utilisés dans le cadre de la commission sont décrits plus en détail dans les Compléments au rapport, nous rappelons ici uniquement leurs grandes caractéristiques.

<sup>2</sup> Il existe d'autres versions avec des couvertures géographiques différentes dont une version mondiale.

POLES-Enerdata<sup>1</sup> 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 France<sup>2</sup> 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

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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'émissions<sup>1</sup>, 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

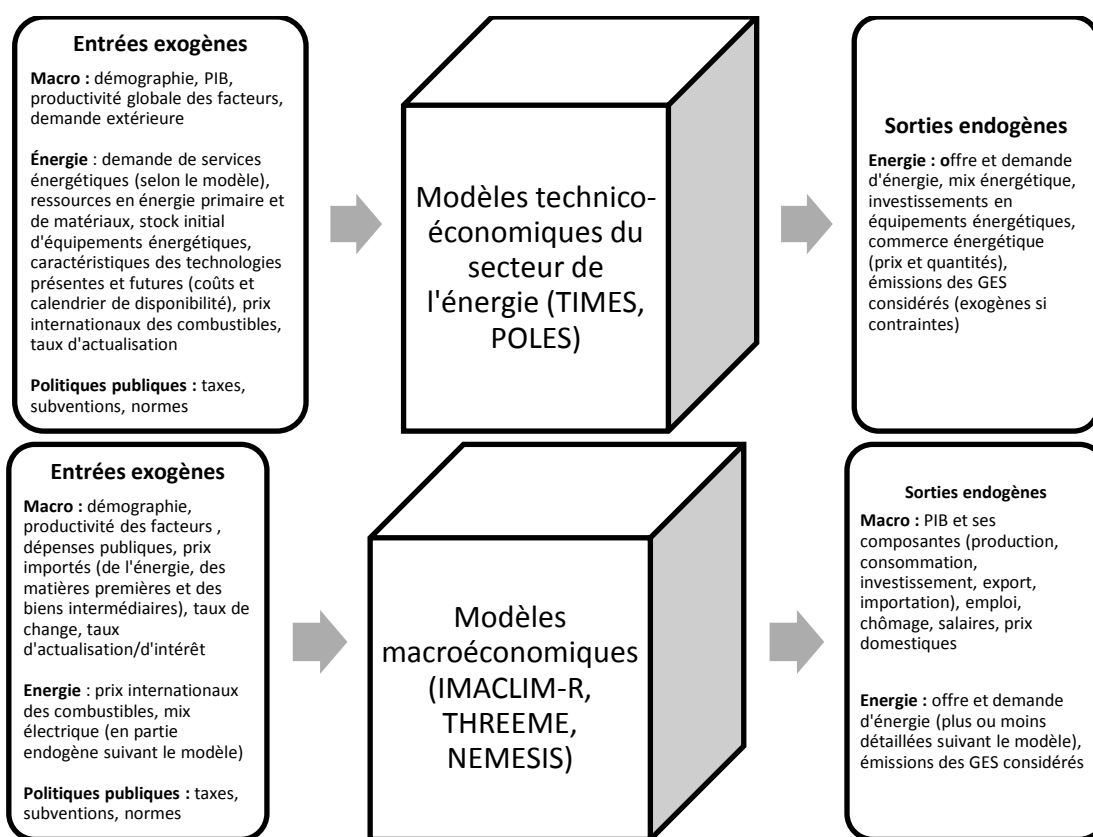
---

<sup>1</sup> 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

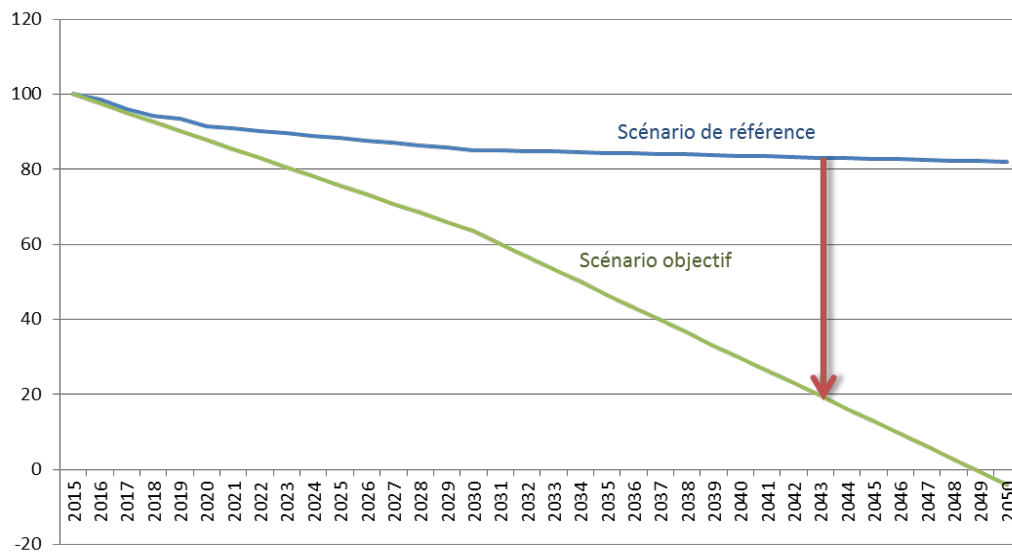


Note : la liste des exogènes et des endogènes variant de façon importante d'un modèle à l'autre y compris au sein d'une même catégorie, ce schéma n'est donné qu'à titre indicatif.

### 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 pays<sup>1</sup>, 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 décarboné<sup>2</sup>** 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.

---

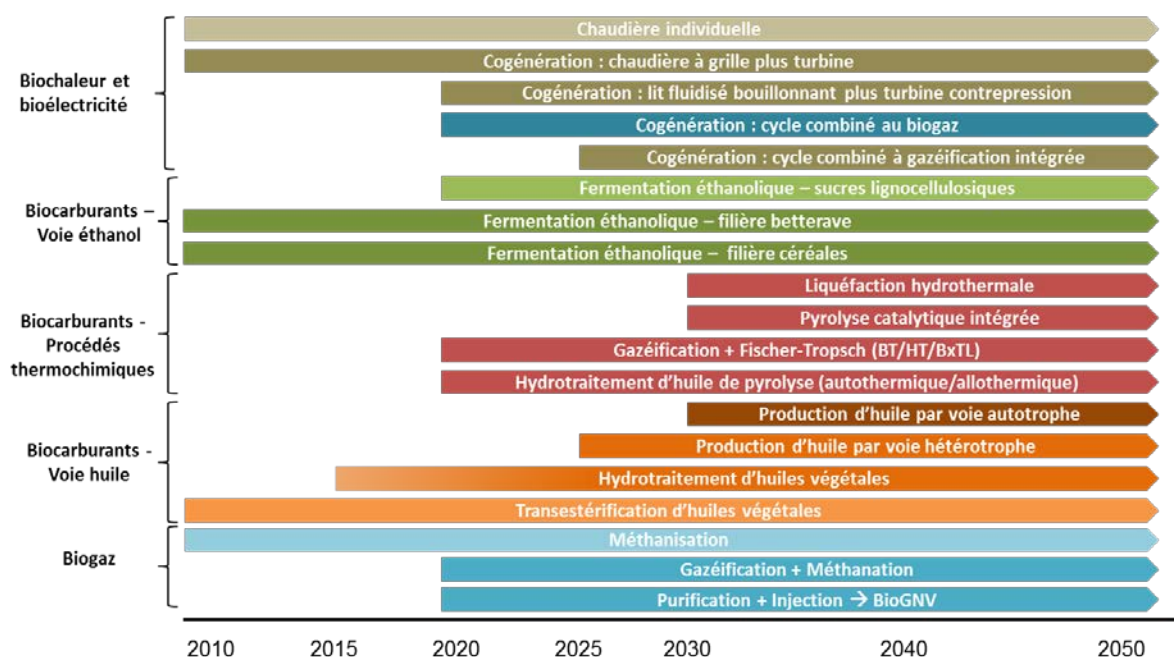
<sup>1</sup> Dans une approche production et non empreinte carbone.

<sup>2</sup> 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-économiques<sup>1</sup> ;
- 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**

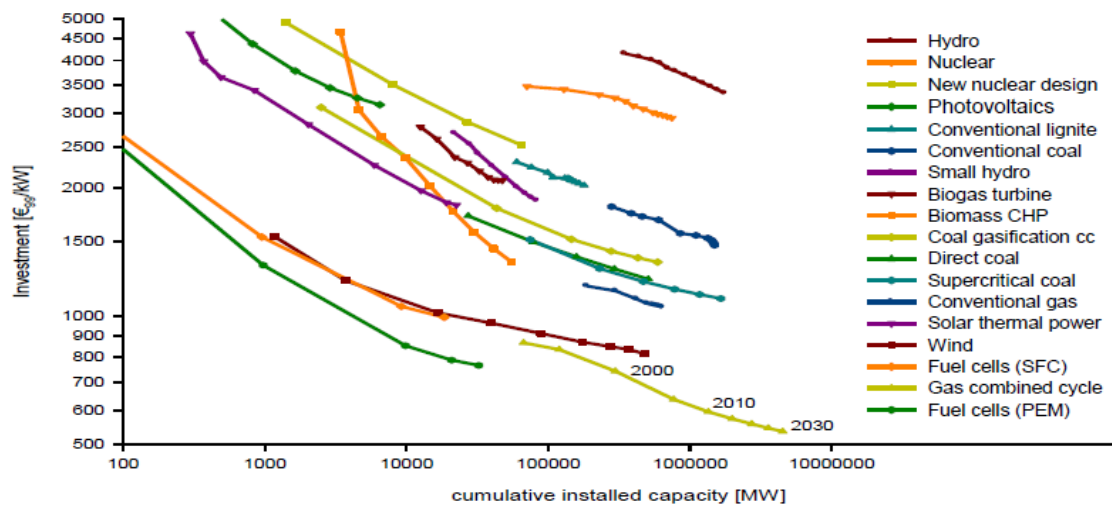


Source : CMA, modèle TIMES

<sup>1</sup> 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 parfaites<sup>1</sup>.

## 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.

<sup>1</sup> 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.

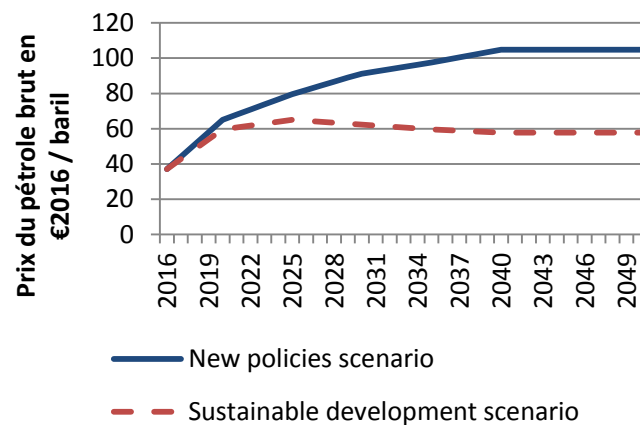
Dans ce cadre, il a été choisi dans cet exercice, premièrement, de prendre un point de vue agnostique sur le contexte international dans le scénario de référence, en écartant les scénarios extrêmes ; et, deuxièmement, de tester la sensibilité des résultats aux différents canaux d'influence du contexte 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* »<sup>1</sup>. 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.

---

<sup>1</sup> 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

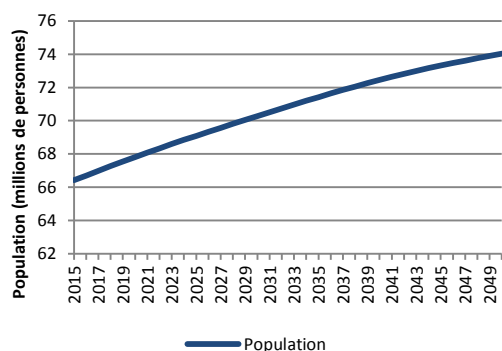
- Il n'est pas supposé dans ces exercices de simulation qu'une technologie de substitution aux technologies carbonées à coût modéré et au potentiel illimité (technologie dite « *backstop* ») puisse être déployée pour abattre les émissions. L'impact de ce choix prudent se justifie aisément à court ou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

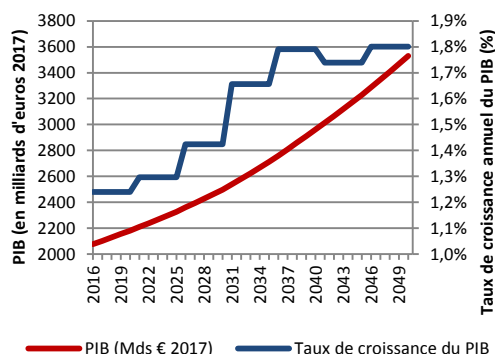
Les hypothèses démographiques et macroéconomiques (homogénéisées entre les modèles) relèvent de projections définies par des institutions publiques de références nationales ou internationales. Les évolutions démographiques françaises sont fondées sur les projections de l'Insee (voir figure 20) ; les 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

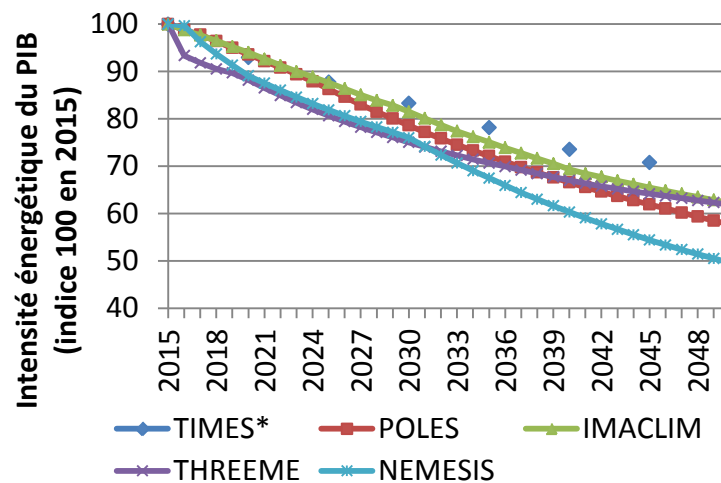
Le scénario de référence n'intègre pas de nouvelles politiques publiques pour lutter contre les émissions de GES au-delà de celles en vigueur en 2017. Il a été choisi de désactiver dans le scénario de référence celles correspondant à un signal-prix explicite (ce qui s'est traduit en particulier par une 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> d'origine énergétique dans le scénario de référence

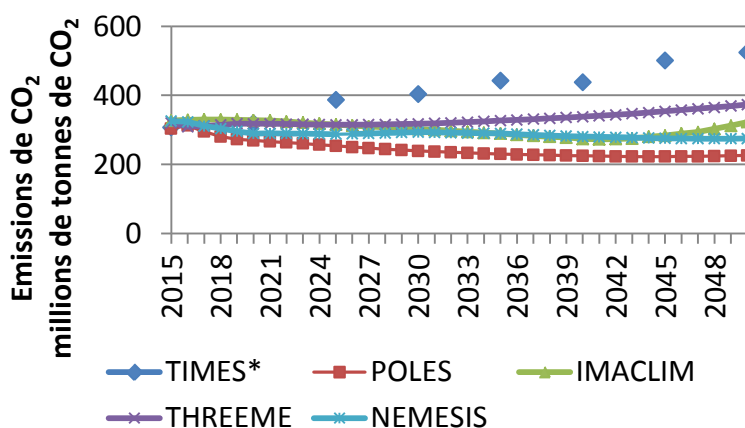
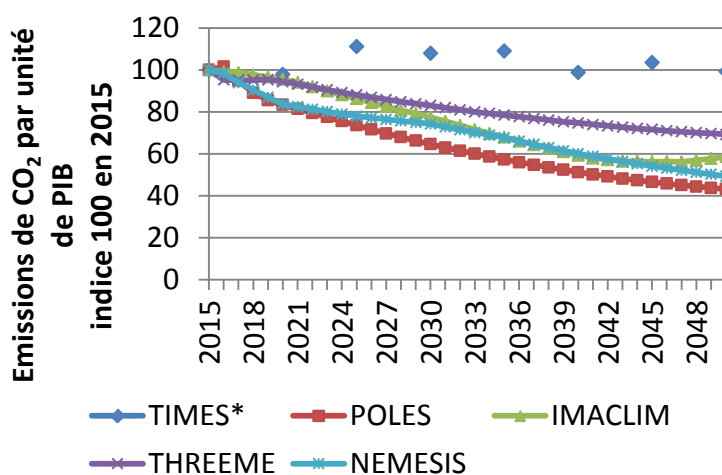


Figure 24 – Émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique par unité de PIB dans le scénario de référence



Note : les émissions considérées ici sont uniquement les émissions de CO<sub>2</sub> 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 commission<sup>1</sup>.

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 <sub>2</sub> e (en orange) et 95 MtCO <sub>2</sub> e (en bleu) (€ <sub>2016</sub> /tCO <sub>2</sub> 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 MtCO<sub>2</sub>e

\*\* Modèle ayant tourné avec une hypothèse d'anticipation parfaite sur la VTC pour des valeurs pour des puits compris entre 85 MtCO<sub>2</sub>e et 95 MtCO<sub>2</sub>e.

Note : pour chaque date, la colonne de gauche correspond à l'hypothèse de puits la plus favorable (95 MtCO<sub>2</sub>e) et la colonne de droite à l'hypothèse de puits la moins favorable (75MtCO<sub>2</sub>e)<sup>2</sup>

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

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

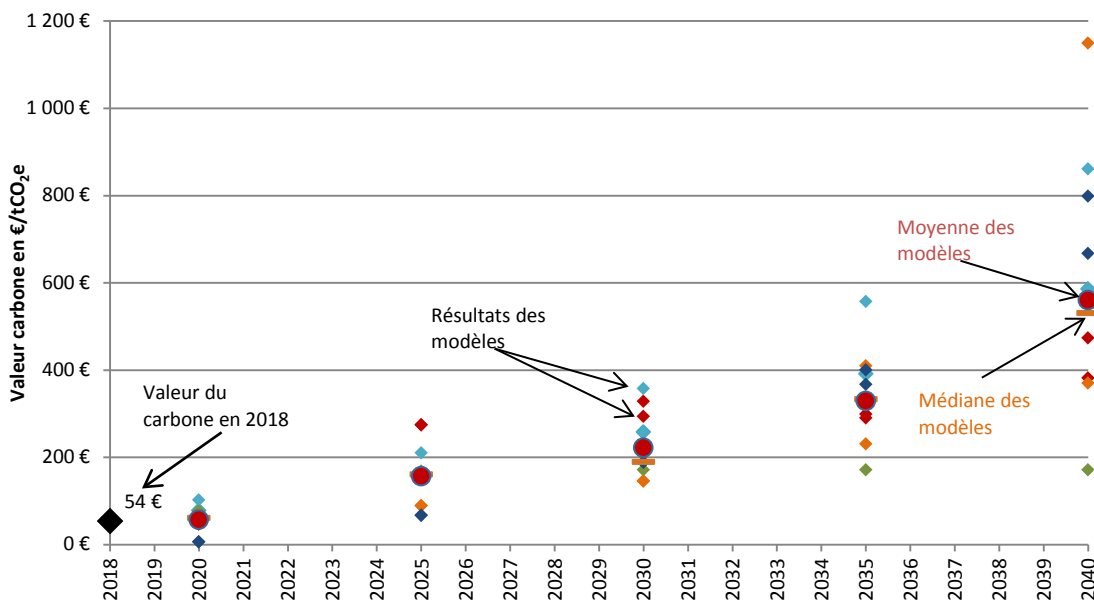
<sup>2</sup> TIMES attribue une valeur plus faible à court terme dans le cas le moins optimiste (288 € contre 322 €) mais l'augmentation de cette valeur sur la fin de période est nettement plus élevée que sous l'hypothèse optimiste de puits.



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 élasticité 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<sub>2e</sub><sup>1</sup> ;

---

<sup>1</sup> 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.

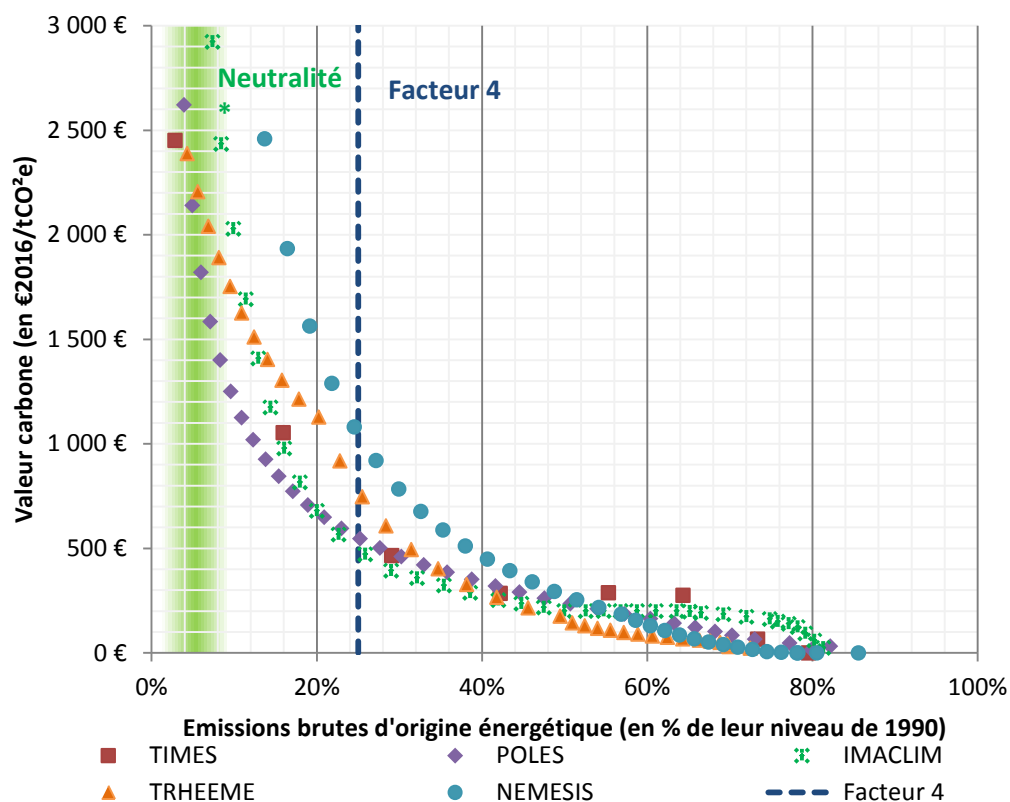
Outre la simple observation de la « flambée » de la valeur carbone simulée, les modèles macroéconomiques décrivent en fin de période une décarbonation davantage associée à une baisse de production qu'à un découplage entre la production et les émissions de GES<sup>1</sup>.

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.

---

<sup>1</sup> 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 MtCO<sub>2</sub>e (85 MtCO<sub>2</sub>e pour IMACLIM) ; les courbes obtenues par les trajectoires sous une hypothèse de puits 95 MtCO<sub>2</sub>e 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 MtCO<sub>2</sub>e et 95 MtCO<sub>2</sub>e.

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 €/tCO<sub>2e</sub> 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 CO<sub>2e</sub> abattue.

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

Technologie		Coût par tCO <sub>2</sub>	Source	
<b>Combustion gaz naturel + CSC</b>	Inclut 10 \$/t pour transport-stockage	40-73 €/t	IEAGHG 2017	Technical Report, Overview Book
<b>Électricité gaz ou charbon + CSC</b>		< 100 €/t	AIE 2017	AIE ETP 2017, figure 6.16
<b>Cimenterie = capture CO<sub>2</sub></b>	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		
<b>Acierie + capture CO<sub>2</sub></b>		60-80 \$/t	AIE 2011	Technology Roadmap CCS in Industrial Applications
<b>Électricité biomasse + CSC</b>	Centrale électrique biomasse = capture CO <sub>2</sub> , avec émissions nettes négatives de – 75 g/kWh	250 \$/t	AIE 2017	AIE ETP 2017, figure 6.16
<b>H2 + capture</b>	Hydrogène fabriqué par vapo-reformage = CSC	47-70 €/t	IEAGHG 2017	Technical Report février 2017
<b>Power to gas</b>	H <sub>2</sub> électrolytique = capture de CO <sub>2</sub> 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
<b>Power to liquid</b>		311 €/t		
<b>Capture CO<sub>2</sub> air</b>	Capture du CO <sub>2</sub> directe dans l'air (DAC)	85 €/t**		
<b>Power to gas</b>	H <sub>2</sub> 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
<b>Power to liquid</b>	H <sub>2</sub> par électrolyse puis transformation en carburant pour mobilité (substitut pétrole)	470 €/t**		

\* Coût cible par tonne de CO<sub>2</sub> 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 H<sub>2</sub>.

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 €/tCO<sub>2</sub>e<sup>1</sup> à 500 €/tCO<sub>2</sub>e<sup>2</sup>. 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 €/tCO<sub>2</sub>e 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 €/tCO<sub>2</sub>e.

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.

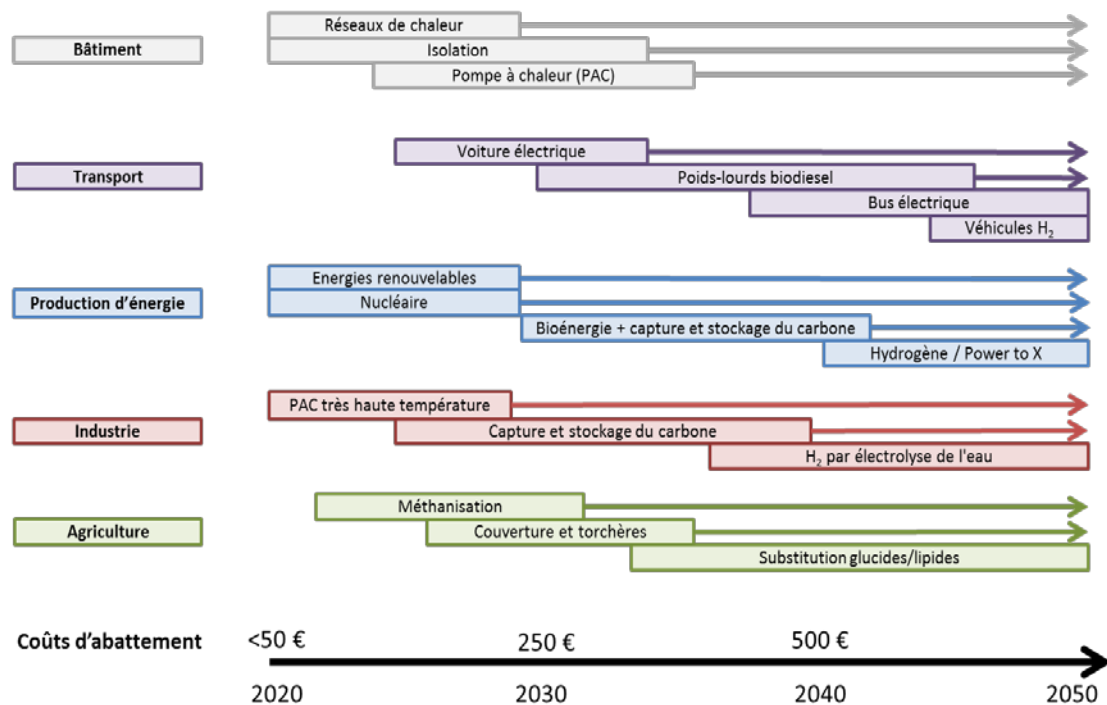
<sup>1</sup> Technologie 7A : modification de l'alimentation animale par le remplacement des sucres par des graisses insaturées et utilisation d'additifs dans l'alimentation des ruminants de sorte à réduire la teneur en protéines dans les rations.

<sup>2</sup> 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 €/tCO<sub>2</sub>e).

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<sub>2e</sub> et l'autre à 75 MtCO<sub>2e</sub><sup>1</sup>. 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.

---

<sup>1</sup> 85 MtCO<sub>2e</sub> pour IMACLIM.



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

		2030	2035	2040
<b>Technico-économiques</b>	<b>TIMES</b>	6 %	1 %	11 %
	<b>POLES</b>	16 %	17 %	19 %
<b>Macroéconomiques sectoriels</b>	<b>IMACLIM*</b>	0 %	0 %	0 %
	<b>ThreeME*</b>	0 %	28 %	51 %
	<b>NEMESIS</b>	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 MtCO<sub>2</sub>e à 95 MtCO<sub>2</sub>e. La valeur carbone obtenue par le modèle POLES en 2040 peut varier de +/-19 % autour de la valeur centrale (85 MtCO<sub>2</sub>e) en fonction des potentiels de puits UTCF (de +/-10 MtCO<sub>2</sub>e autour de 85 MtCO<sub>2</sub>e). 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 coûteux<sup>1</sup>. 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 MtCO<sub>2</sub>e 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 nationaux<sup>2</sup>, 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 °C<sup>3</sup>.

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

---

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

<sup>2</sup> Scénario dénommé « *New policies scenario* » par l'AIE.

<sup>3</sup> 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
<b>TIMES</b>	Écart en €	+ 3 € à 20 €	+ 34 €
	Écart en %	+ 1 % à 7 %	+ 7 % à 9 %
<b>NEMESIS</b>	Écart en €	+ 14 €	+ 50 €
	Écart en %	+ 7 % à 8 %	+ 6 % à 8 %
<b>Prix du pétrole</b>	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 %<sup>1</sup> 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

---

<sup>1</sup> 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 rapport<sup>1</sup>, 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 recelant 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

---

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub> évitée grâce à cette technologie serait donc de 770 €.

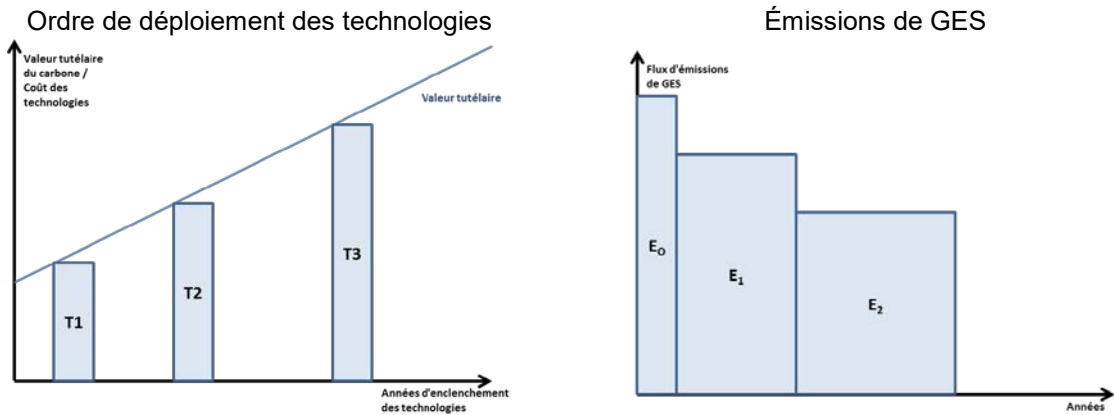
En 2050, selon les scénarios de coopération internationale (hypothèses conjointes de volumes déployés et de taux d'apprentissage) le coût d'abattement lié à cette technologie pourrait être largement réduit.

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 CO<sub>2</sub> évitées serait proche de 600 €/tCO<sub>2e</sub> (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 CO<sub>2</sub> évitées pourrait en revanche être abaissé à 470 €/tCO<sub>2e</sub> (le prix des équipements pouvant être abaissé de 75 %).

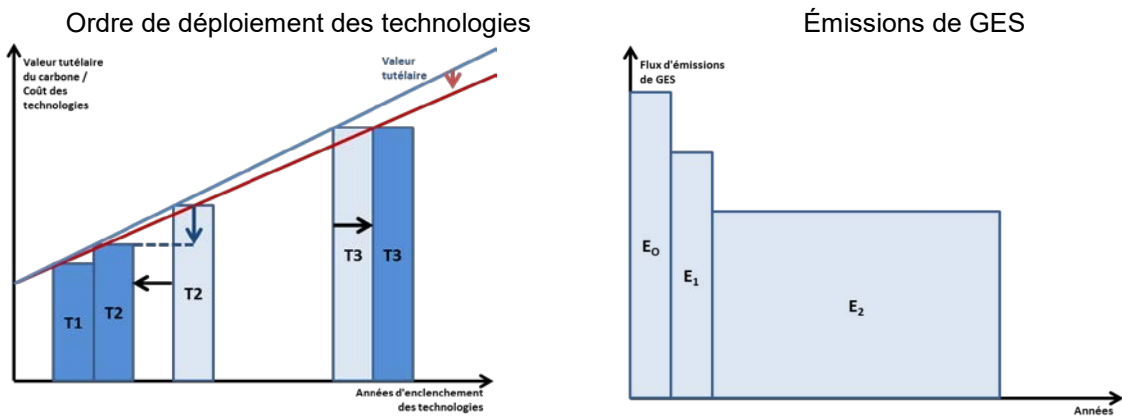
*Sources : calculs réalisés à partir de données issues de Frontier Economics Ltd 2018, « The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels », commissioned by Agora Energiewende et Agora Verkehrswende ; FVV 2016, « Renewables in Transport 2050 », Forschungsvereinigung Verbrennungskraft-maschinen e. 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**



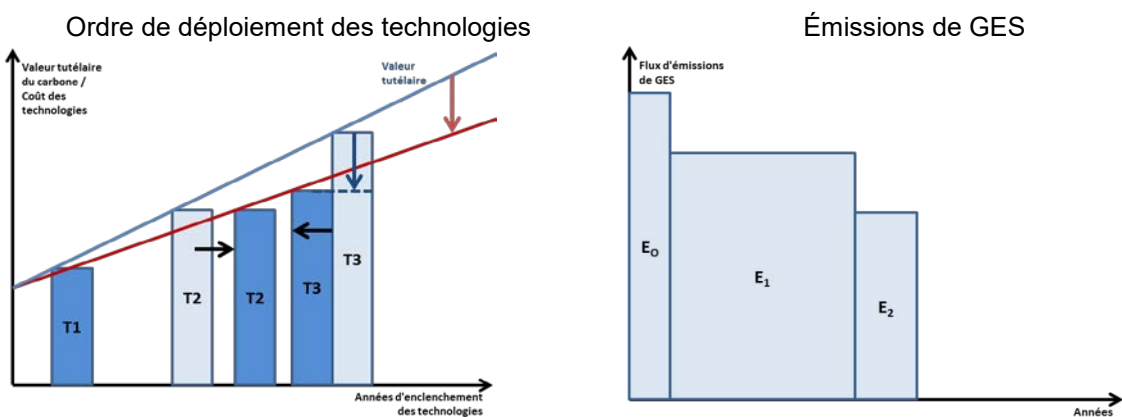
Source : France Stratégie, les auteurs

**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
<b>Doublement des élasticité</b>	Baisse d'un tiers de la valeur
<b>Élasticité augmentées de 50 %</b>	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
<b>Puits UTCF / achat de permis à l'étranger</b>	+/- 10 MtCO <sub>2</sub> e de puits autour de l'hypothèse centrale de 85 MtCO <sub>2</sub> 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
<b>Prix des énergies fossiles</b>	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 %		
<b>Compétitivité</b>	Pas de variante modélisée	Impact sur les variables macroéconomiques non sur la valeur tutélaire		
<b>Progrès technologique</b>	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
<b>Comportement des agents</b>	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 MtCO<sub>2</sub>e à 95 MtCO<sub>2</sub>e, 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.

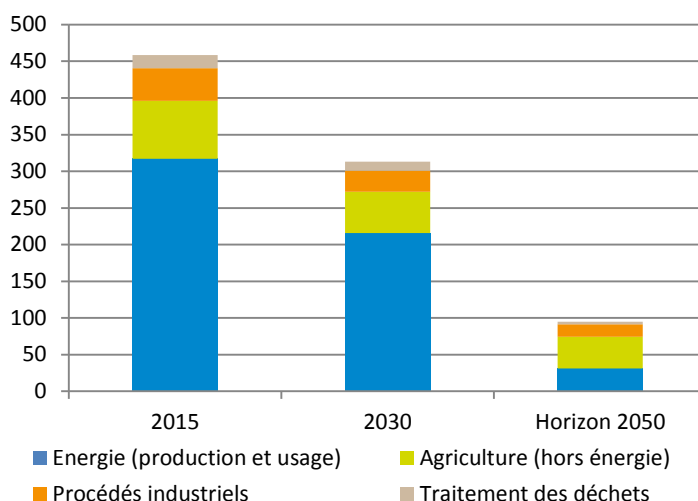
**Tableau 14 – Les réductions d'émissions de GES par source d'émissions**

Source d'émissions	Émissions 1990	Émissions 2030		Émissions 2050	
	MtCO <sub>2</sub> e	MtCO <sub>2</sub> e	% des émissions de 1990	MtCO <sub>2</sub> 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
<b>Total</b>	<b>546</b>	<b>311</b>	<b>57 %</b>	<b>75-95 selon les puits</b>	<b>14 %-17 % selon les puits</b>

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 MtCO<sub>2</sub>e)**



\* Sous l'hypothèse de puits UTCF de 95 MtCO<sub>2</sub>e.

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

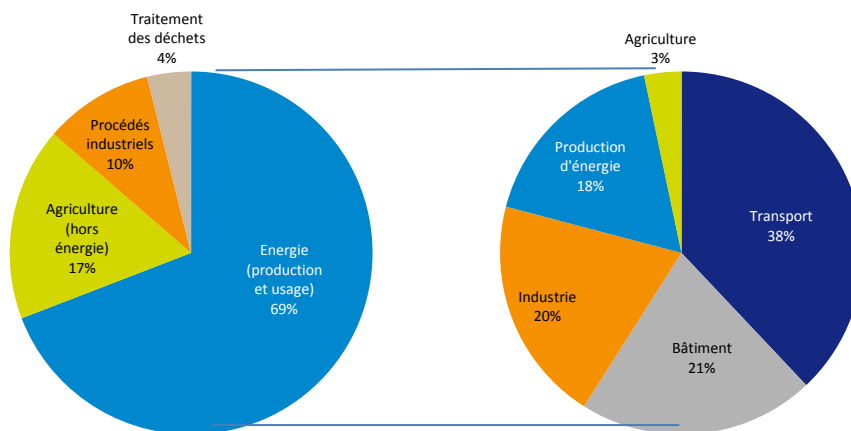
### **La répartition sectorielle des efforts de réduction des émissions d'origine énergétique**

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 MtCO<sub>2</sub>e. 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 MtCO<sub>2</sub> 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).

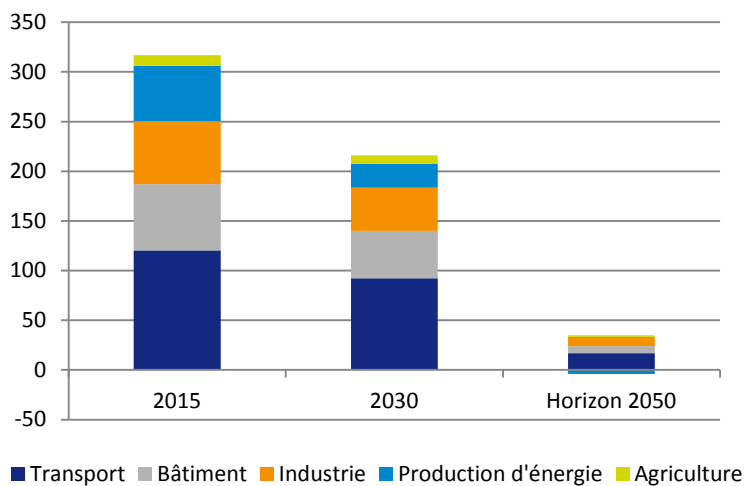
- Le secteur de production d'énergie pourrait atteindre des émissions négatives, à l'aide notamment du déploiement de la BioCSC, laquelle permettrait d'absorber des émissions d'autres secteurs.
- Les autres secteurs économiques se décarboneraient tous dans des proportions importantes.
- En volume, les 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**



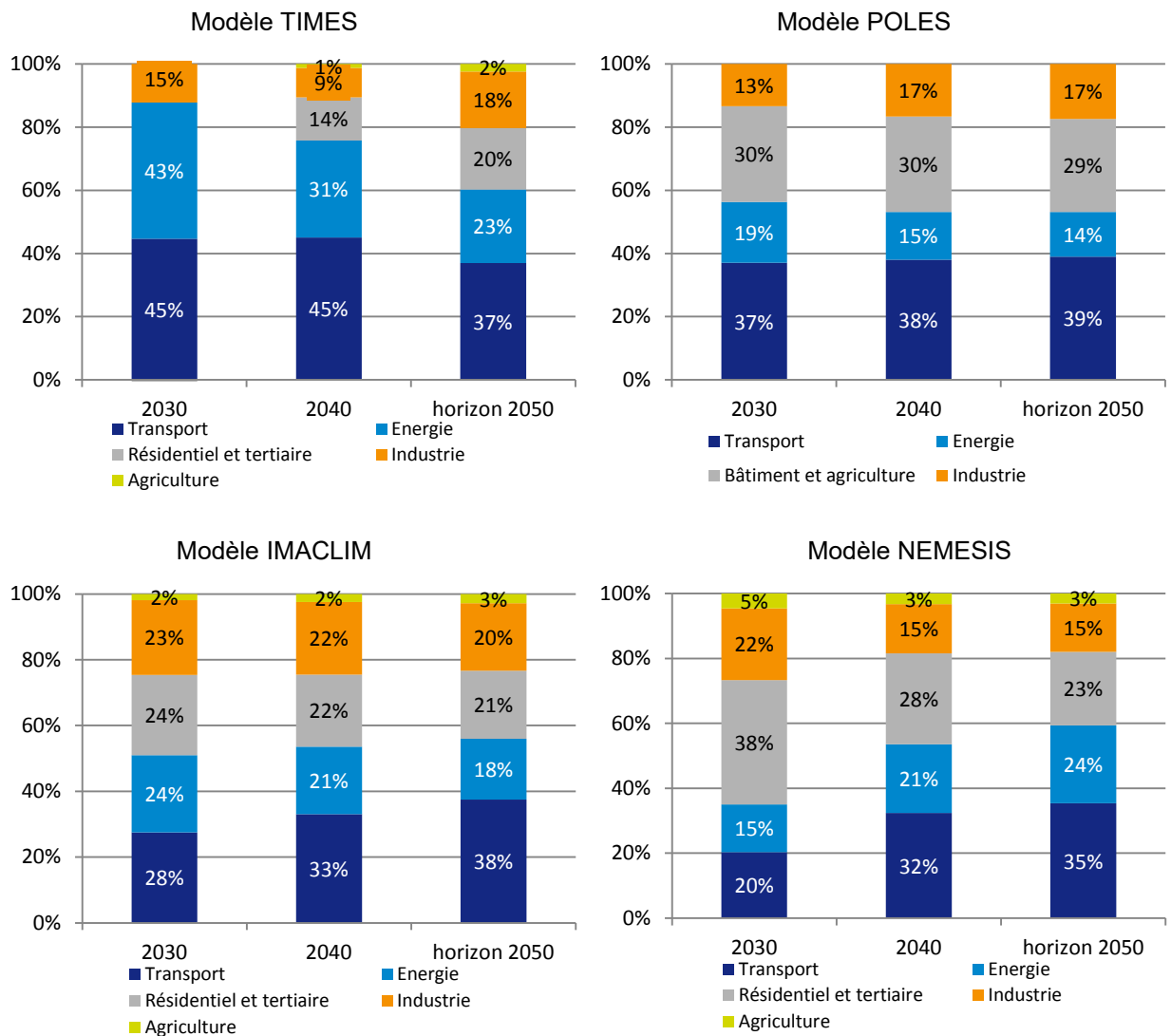
Source : chiffres DGEC, inventaire 2015 et données des modèles

**Figure 33 – La décarbonation sectorielle des émissions d'origine énergétique (moyenne indicative des modèles en millions de tonnes de CO<sub>2</sub>)**



Source : calcul des auteurs à partir des données des modèles

**Figure 34 – Contributions sectorielles à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> 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 ».

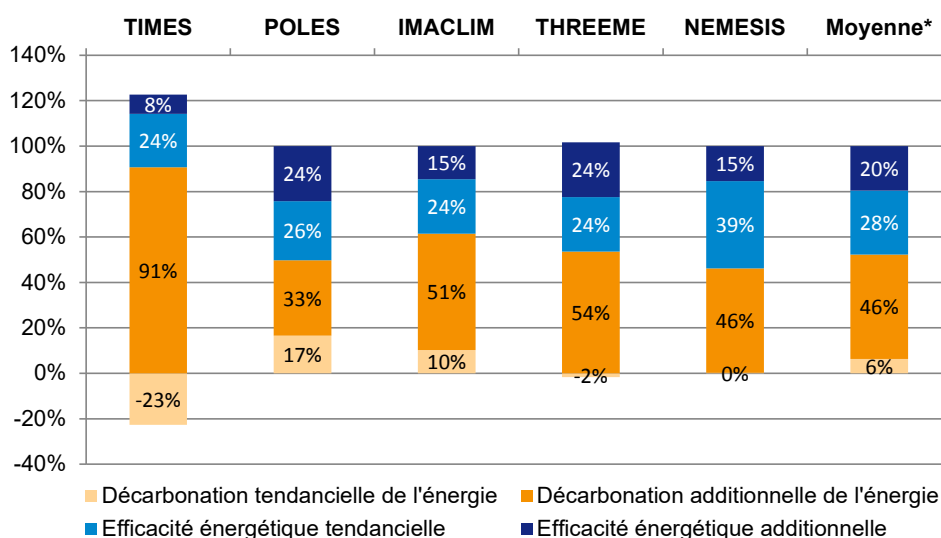
## La neutralité carbone du système énergétique est rendue possible par les économies d'énergie autant que par la décarbonation de l'énergie

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)<sup>1</sup> :

- 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

<sup>1</sup> 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'incertitudes<sup>1</sup>.
- 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

---

<sup>1</sup> 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 infrastructures<sup>1</sup> ;
- le *New Climate Economy Report*<sup>2</sup>, s'appuyant sur différents travaux<sup>3</sup>, 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 européenne<sup>4</sup> 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.

---

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

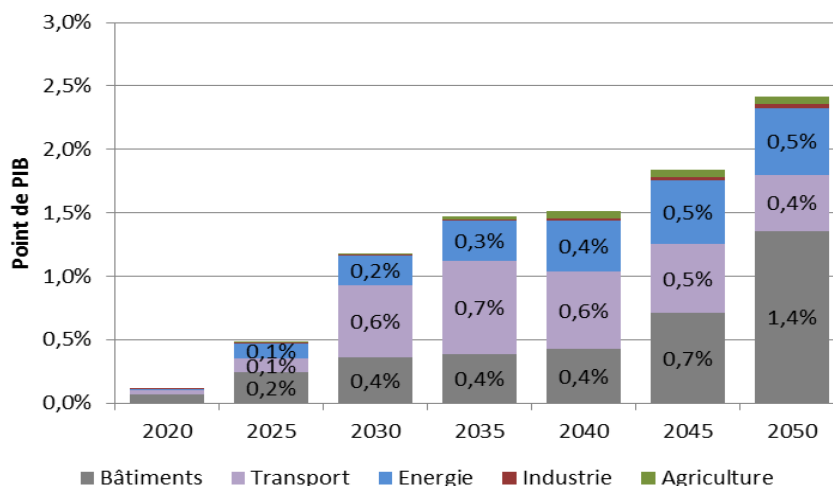
<sup>2</sup> New Climate Economy (2016), *The Sustainable Infrastructure Imperative. Financing for better growth and development*.

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

<sup>4</sup> 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**

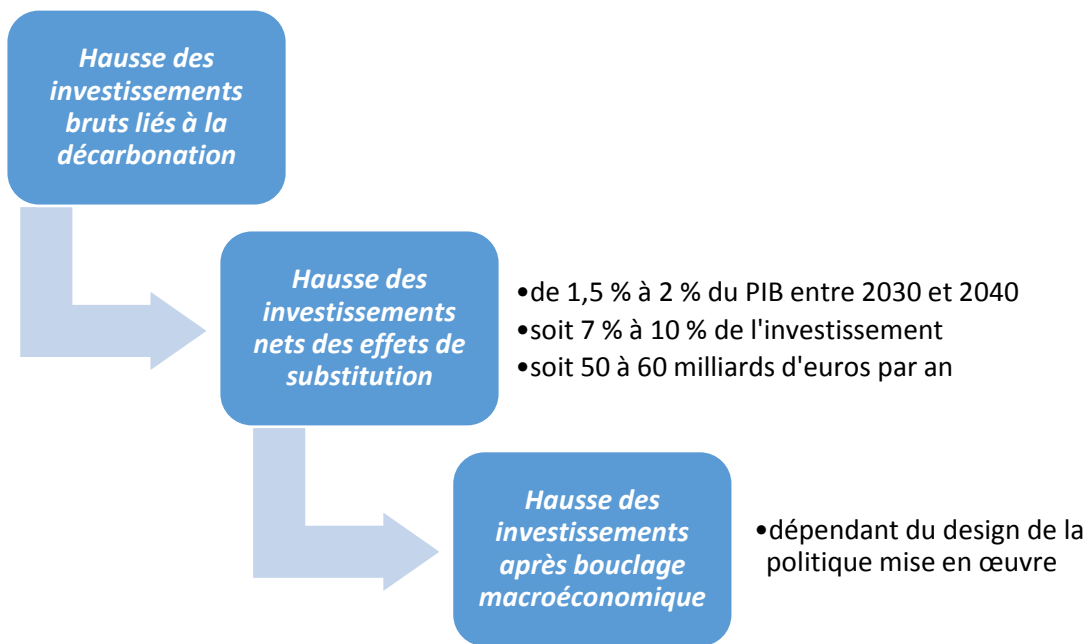


Source : simulation du modèle TIMES (hypothèse de puits UTCF de 85 MtCO<sub>2</sub>e)

- 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 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2e</sub> 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 €<sub>2008</sub>/tCO<sub>2e</sub> (110 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2e</sub>), la commission propose de la réviser substantiellement à la hausse, en la fixant à 250 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2e</sub>. 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 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2e</sub>, 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 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2e</sub>, 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*<sup>1</sup> », 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'eau<sup>2</sup>) 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.

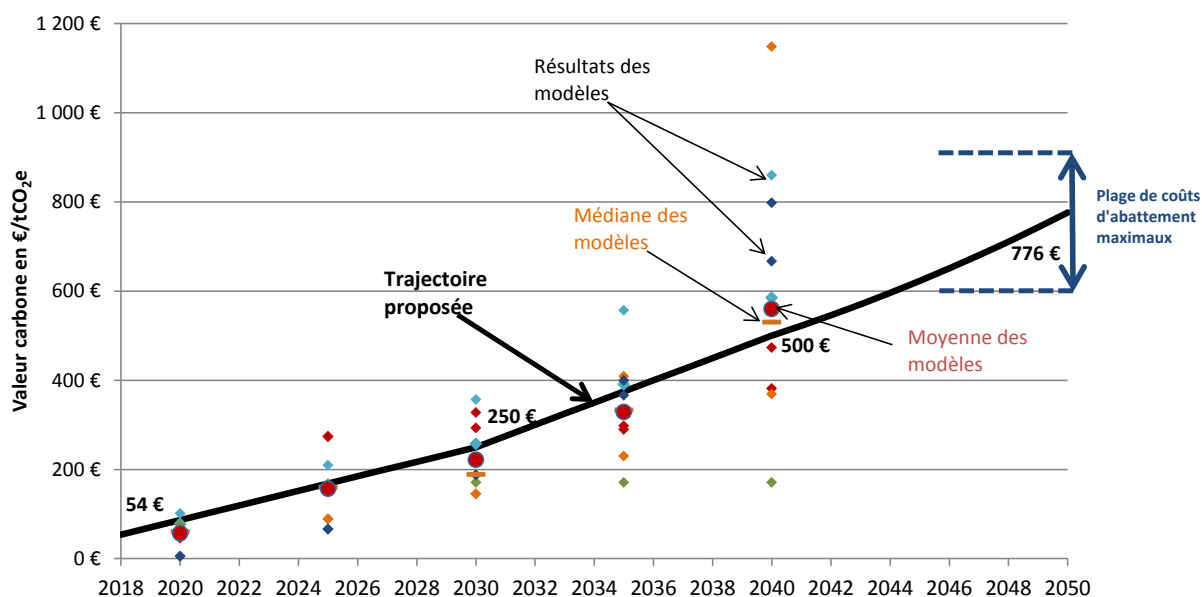
Cette trajectoire aboutit à une valeur de 500 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2040 et à 775 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2050.

---

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

<sup>2</sup> 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.

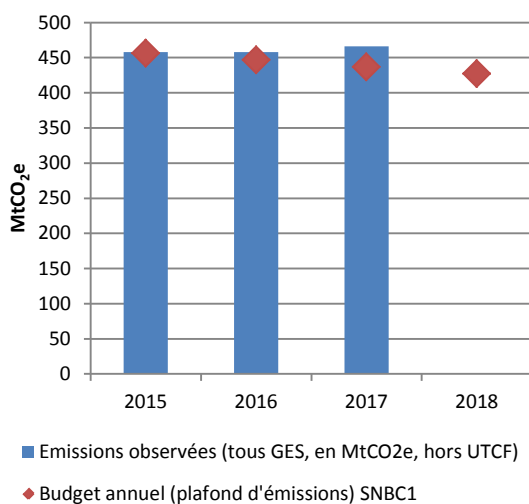
- **L'épuisement du budget carbone :**

- 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 ;

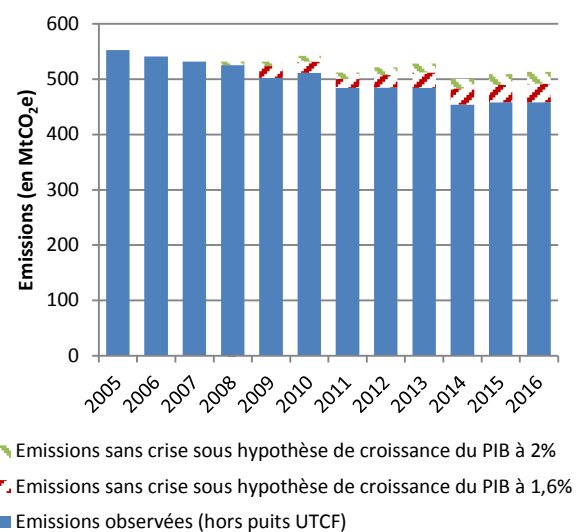
- l'objectif de neutralité carbone « nette » en 2050 adopté récemment par la France est plus ambitieux que l'objectif facteur 4, puisqu'il correspond désormais à un facteur de réduction compris entre 5 et 7 selon les hypothèses de puits retenues.

**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

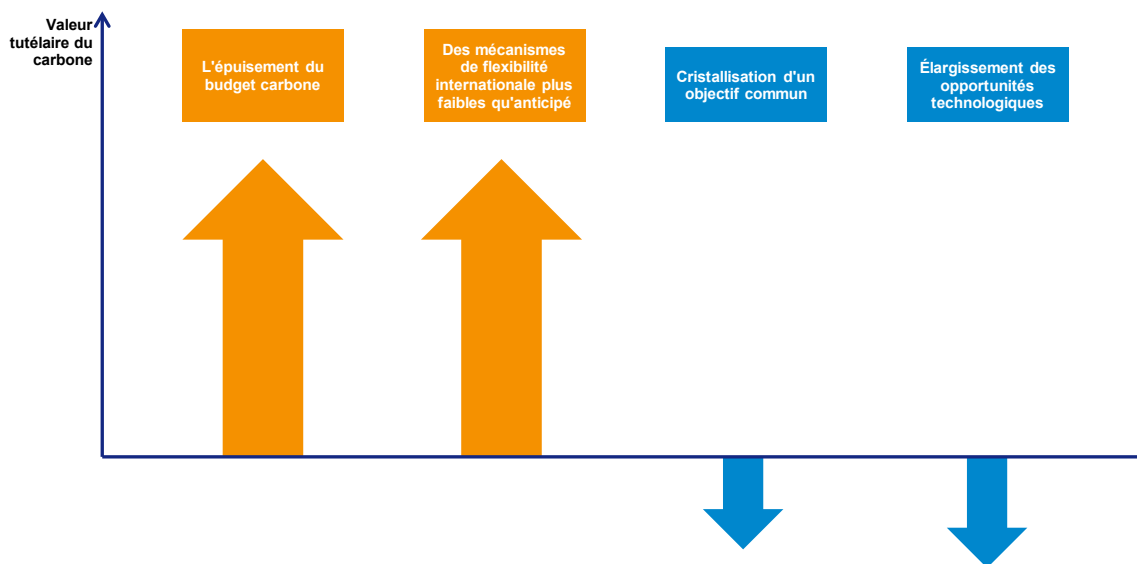
- **Le caractère très limité des mécanismes de flexibilité internationale (prix du carbone, échange de permis).** Contrairement à 2008, la commission a jugé prudent de ne pas intégrer dans la construction de la trajectoire future la possibilité de compenser un surplus d'émissions par des achats de droits 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 \$<sub>2010</sub>/tCO<sub>2e</sub> 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 \$<sub>2010</sub>/tCO<sub>2e</sub> (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 \$<sub>2010</sub>/tCO<sub>2e</sub>)**

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

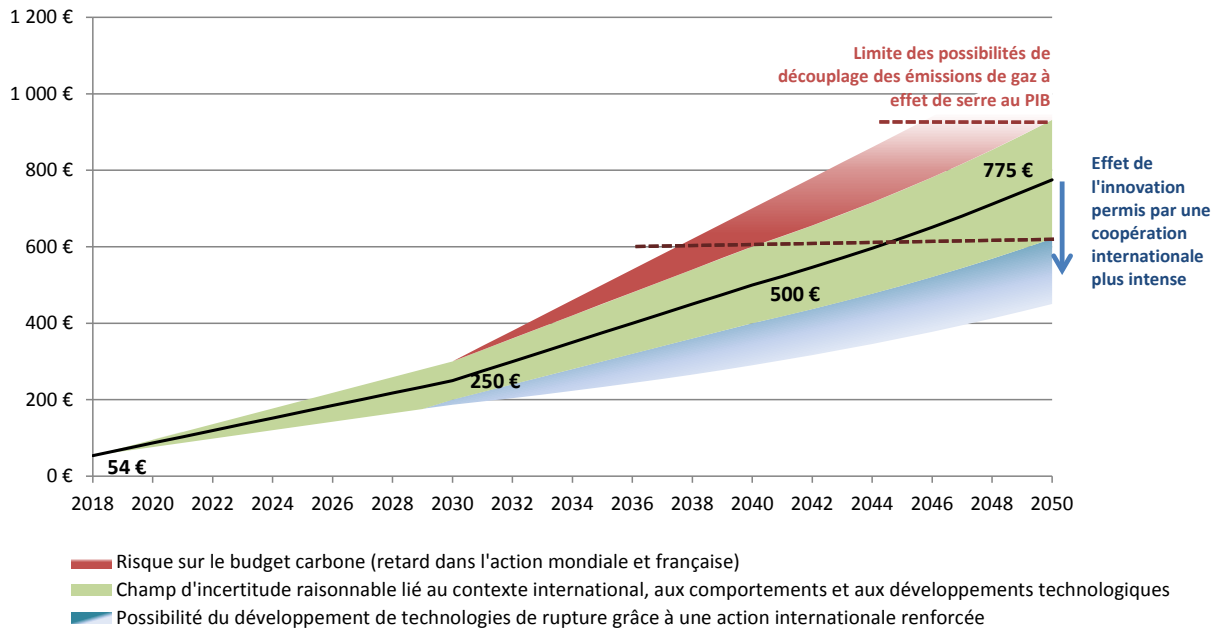
- La borne basse de la fourchette correspondrait à une situation où la décarbonation bénéficierait d'un déploiement plus rapide de nouvelles technologies et de changements de comportements de tous les acteurs, reflétant une prise de conscience sociétale des enjeux de la lutte contre le changement climatique.

### **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 CO<sub>2</sub> 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'aux alentours de 450 €/tCO<sub>2</sub>e.
- 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 €/tCO<sub>2</sub>e –, 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

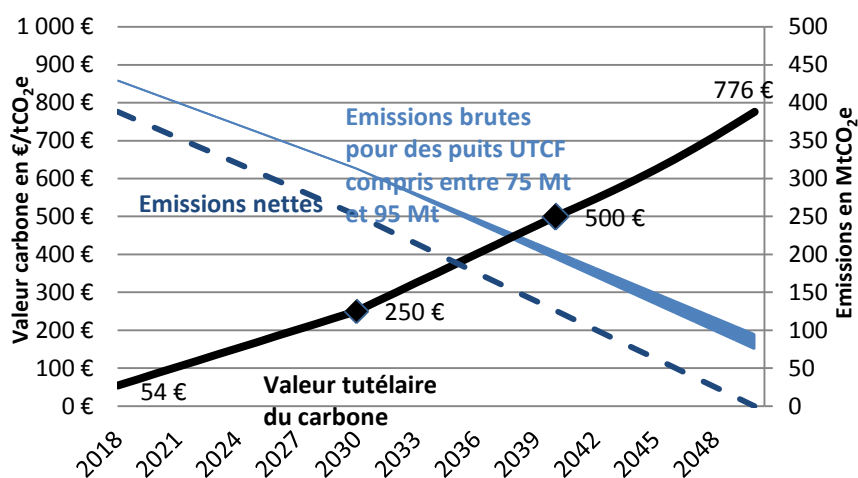
## 4. La valorisation des actions de décarbonation

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

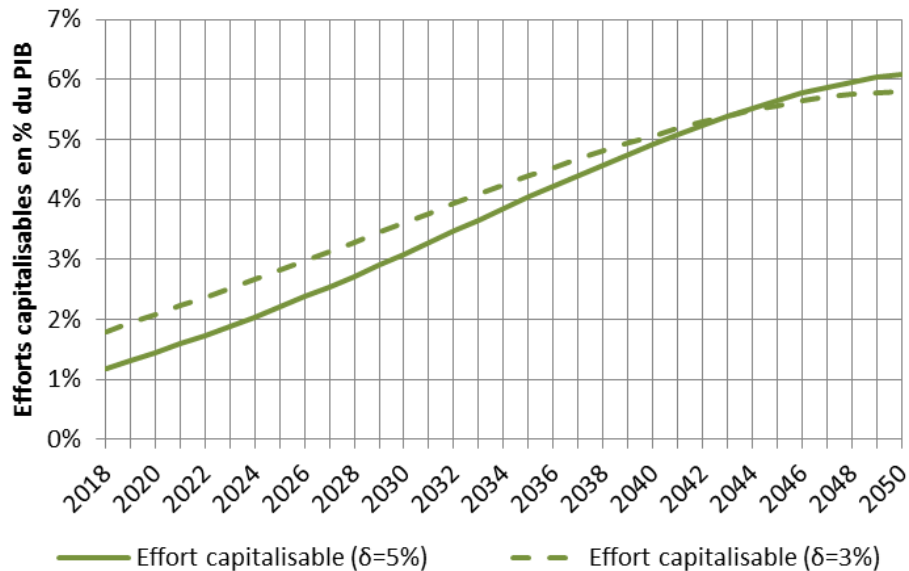
La trajectoire de valeur carbone a pour objectif de donner une valeur socioéconomique aux « actions » visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, de sorte à constituer un « capital vert » permettant la décarbonation de l'économie. Ces actions conduisant à réduire les émissions peuvent être 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  $\delta$ )**



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 MtCO<sub>2</sub>e, un taux d'actualisation de 4,5 % et un taux de croissance annuel du PIB de 1,6 %.

Source : France Stratégie, calcul des auteurs

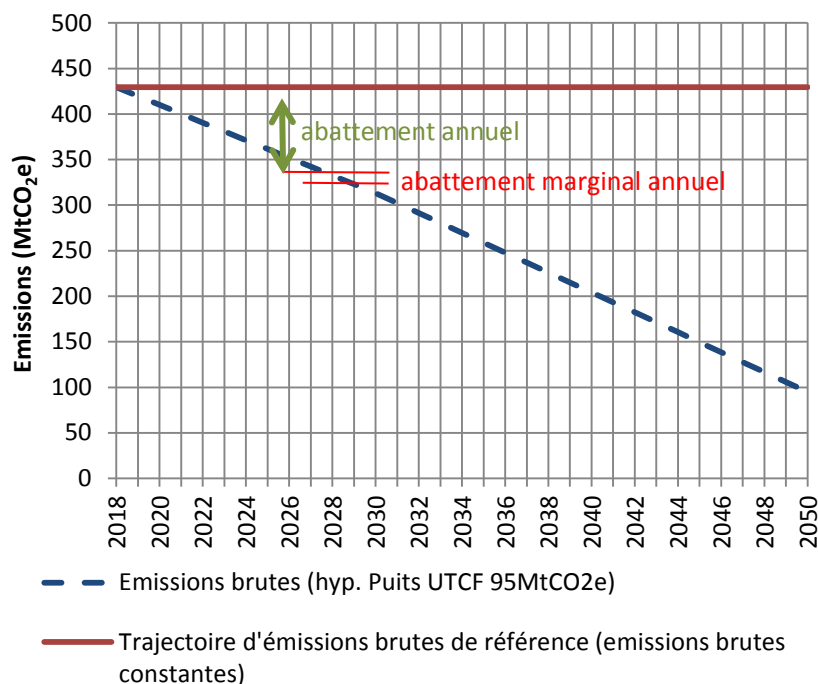
### Encadré 9 – Le calcul de la valeur des abattements et du montant des efforts annuels pour y parvenir

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 CO<sub>2</sub>e par an selon les hypothèses de puits (75 MtCO<sub>2</sub>e ou 95 MtCO<sub>2</sub>e).

- une valeur tutélaire du carbone croissante telle que décrite par la figure 42 : 250 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e en 2030 ; 500 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e en 2040 ; 775 €<sub>2018</sub>/tCO<sub>2</sub>e en 2050. Post-2050, la valeur tutélaire est ensuite considérée comme constante<sup>1</sup>.

**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 CO<sub>2</sub>e de l'abattement marginal annuel.

<sup>1</sup> 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  $\delta$  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  $\delta$  compris entre 3 % et 5 %.

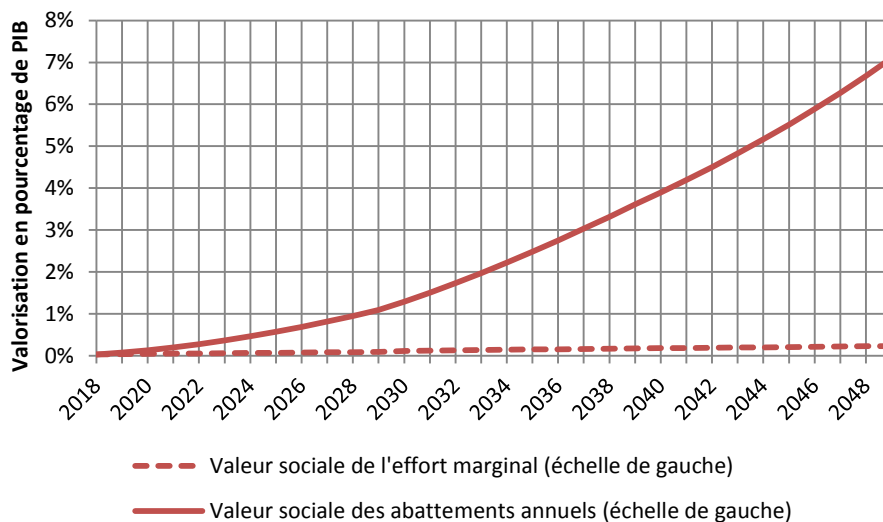
## 4.2. La valeur des émissions évitées par les actions engagées

La valeur tutélaire du carbone permet d'évaluer la valeur pour la collectivité des actions permettant d'éviter l'émission d'une tonne équivalent CO<sub>2</sub>.

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

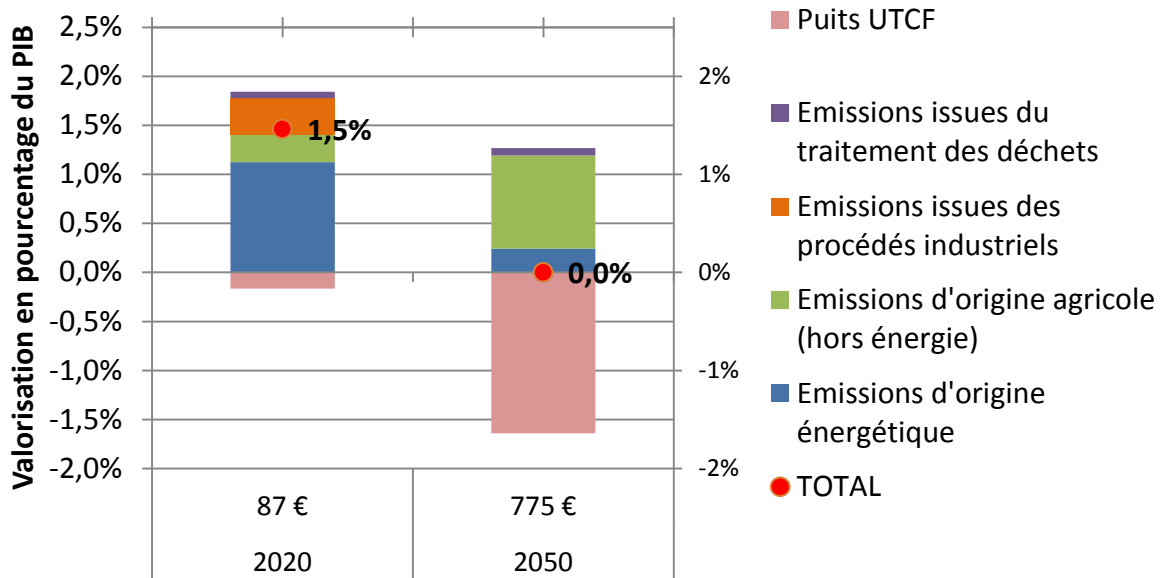
Avec les valeurs de la trajectoire proposée, la valorisation totale des émissions nettes de GES – qui correspond au coût socioéconomique des émissions résiduelles de GES<sup>1</sup> – s'élèverait à 1,5 % du PIB en 2020. Cette évaluation donne une mesure du coût de la non-action en 2020.

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).

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

Valeur des émissions = Valeur carbone (€/tCO<sub>2</sub>e) \* niveau des émissions (tCO<sub>2</sub>e)/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 PIB<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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 électriques<sup>1</sup>) 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).

---

<sup>1</sup> 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 Guesnerie<sup>1</sup>, qui s'appuie notamment sur le rapport du groupe présidé par Émile Quinet de 2013<sup>2</sup>. Le rapport de 2017 présente en particulier la formule de la valeur actualisée nette (VAN) socioéconomique d'un investissement.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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 simplifiée<sup>1</sup> 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.

<sup>1</sup> 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
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>55</b>	<b>288</b>

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 <sup>1</sup>	dont impact carbone sur la base de la trajectoire de valeur tutélaire de 2009	Carbone/Coût
		(M€ <sub>2015</sub> )	(M€ <sub>2015</sub> )	(M€ <sub>2015</sub> )	%
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 <sub>2</sub> 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)<sup>2</sup>

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.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Rapports en ligne sur le site du SGPI : [www.gouvernement.fr/Rapports\\_CE](http://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€ <sub>2015</sub> )	(M€ <sub>2015</sub> )
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 <sub>2</sub> 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 2009<sup>1</sup>, complété par le rapport France Stratégie de 2013 sur l'évaluation socioéconomique<sup>2</sup>. 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

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

<sup>2</sup> 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 2050<sup>1</sup>. 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'anticipé<sup>2</sup>, 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.

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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 Gollier<sup>1</sup> 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 décisions<sup>2</sup>***

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

---

<sup>1</sup> Centre d'analyse stratégique (2011), *Le calcul du risque dans les investissements publics*, rapport de la mission présidée par Christian Gollier.

<sup>2</sup> 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 Gollier<sup>1</sup>, 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

---

<sup>1</sup> 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 décarboné<sup>1</sup> montre qu'il suffit de stabiliser la valeur tutélaire du carbone pour préserver les incitations à le renouveler dans la durée.

---

<sup>1</sup> 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

---

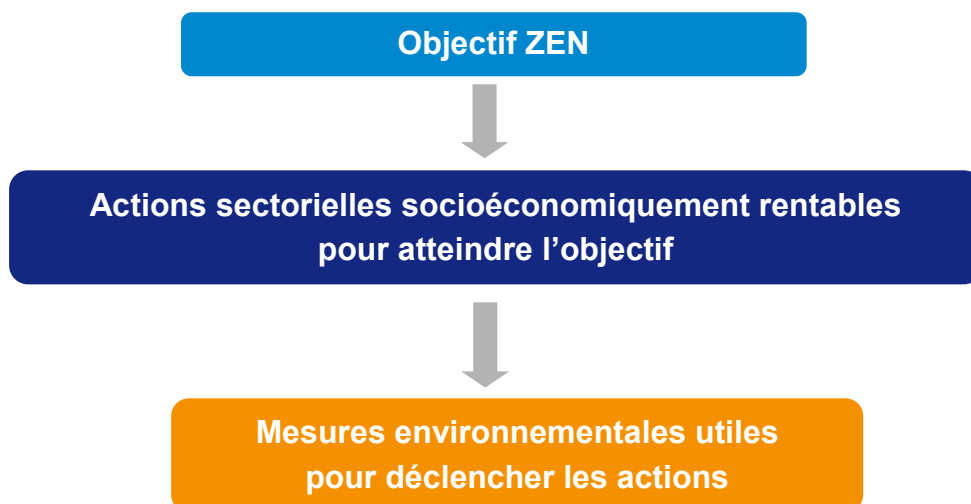
La valeur de l'action pour le climat ou valeur tutélaire du carbone constitue l'ingrédient de base d'un cadre d'évaluation qui doit permettre de répondre à trois questions fondamentales :

- 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 CO<sub>2</sub>e émise. Cet investissement peut être mesuré en euros à la tonne de CO<sub>2</sub>e 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 tCO<sub>2</sub>e chaque année pendant dix ans représente un coût de 100 € par tonne de CO<sub>2</sub>e 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 covoiturage<sup>1</sup>.
- **Les actions à coût d'abattement positif mais relativement faible**, inférieur à 100 €/tCO<sub>2e</sub>. 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<sub>2e</sub>-250 €/tCO<sub>2e</sub>**. 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.

---

<sup>1</sup> Dans le cas où il ne nécessite pas la mise en place d'infrastructures spécifiques.

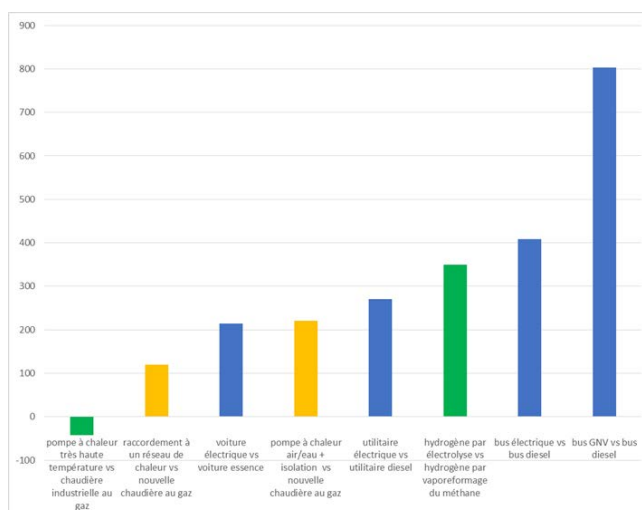
### Encadré 12 – Quelques études récentes relatives au coût d'abattement

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 €/tCO<sub>2</sub>e, pour un investissement réalisé aujourd'hui**

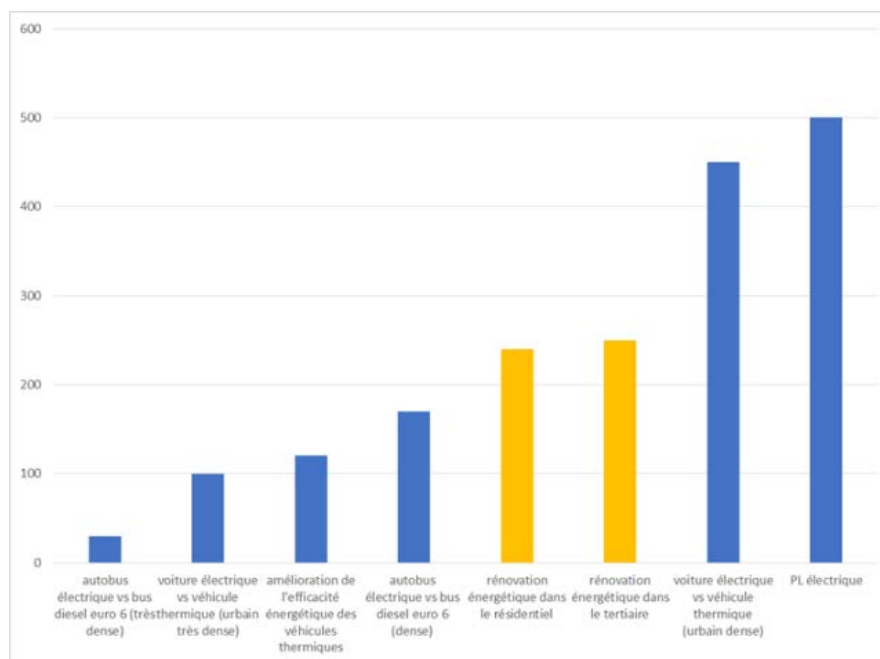


Source : Carbone 4, baromètre de la décarbonation, novembre 2018. Orange : logement ; bleu : transport ; vert : industrie. La méthode utilisée ne tient pas compte des cobénéfices mais intègre les émissions liées à la production des batteries pour véhicules électriques. Dans le calcul, les émissions au 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 €/tCO<sub>2</sub>e, pour un investissement réalisé en 2020**



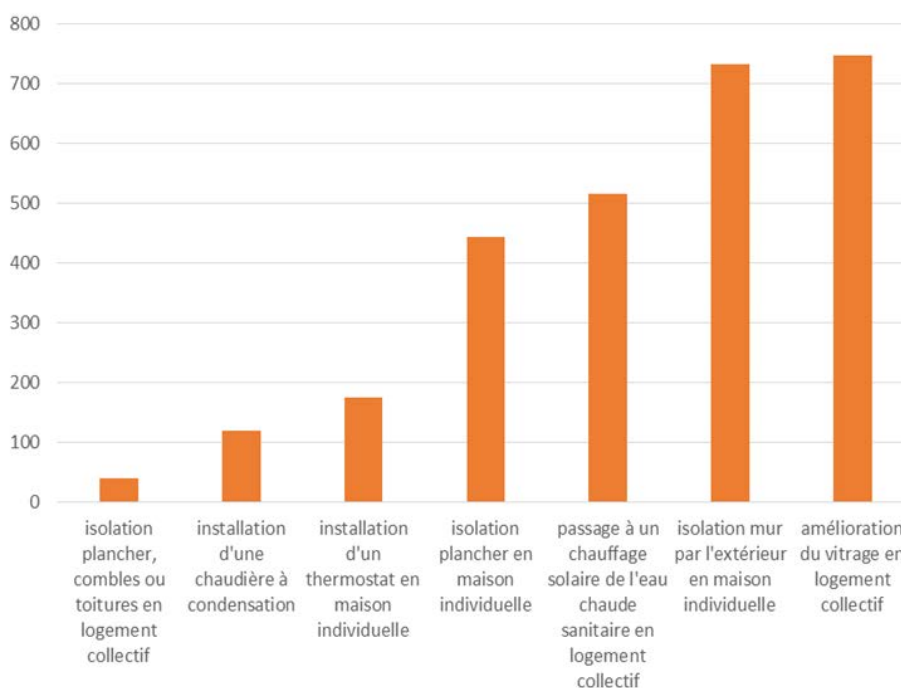
Source : CDGG 2019, contribution au présent rapport. Orange : logement ; bleu : transport. Pour le détail, voir les Compléments au rapport. Certains calculs tiennent compte du coût d'opportunité des fonds publics, et certains calculs tiennent compte de la pollution locale. Les émissions liées à la fabrication 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 €/tCO<sub>2</sub>e, 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 €/tCO<sub>2</sub> 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.

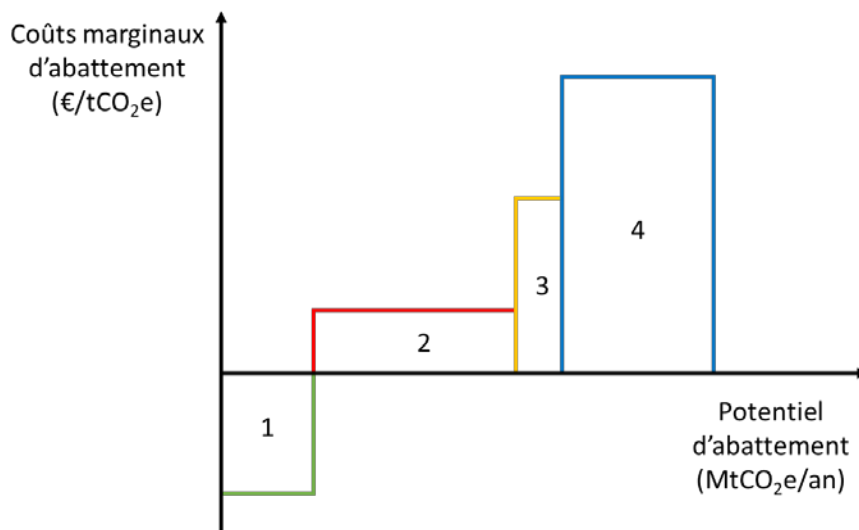


## 1.2. Une approche dynamique de l'ordre de mérite

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 €/tCO<sub>2</sub>e) est inférieur à la valeur tutélaire actualisée moyenne<sup>1</sup> 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)<sup>2</sup>. 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

<sup>1</sup> Pondérée par les réductions d'émissions annuelles.

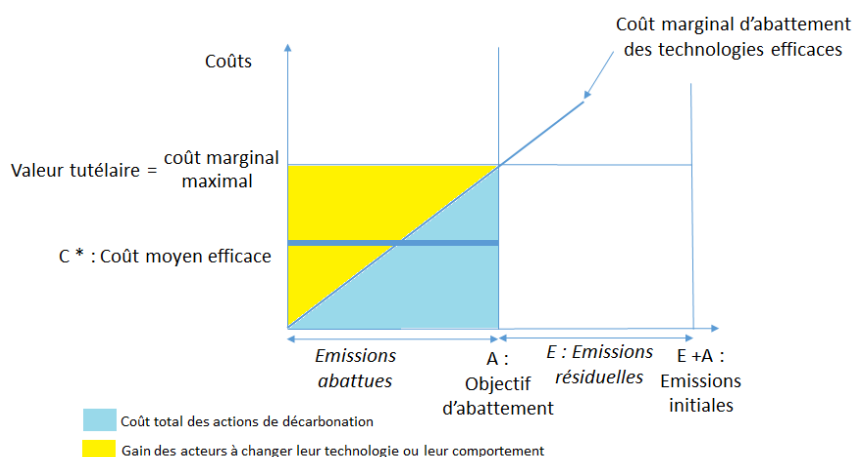
<sup>2</sup> Vogt-Schilb A., Hallegatte S. et de Gouvello C. (2014), « Long-term mitigation strategies and marginal abatement cost curves: A case study on Brazil », *Policy Research working paper*, n° WPS 6808, Washington DC, World Bank Group.

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**



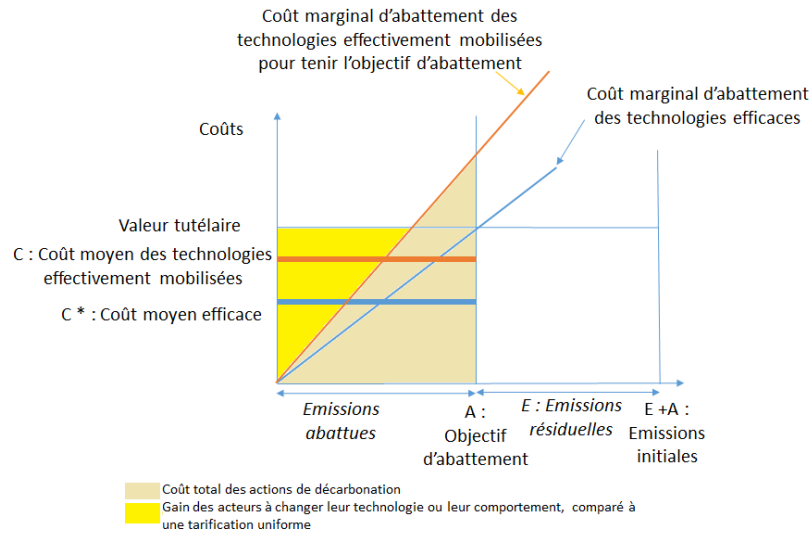
Source : France Stratégie

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

<sup>1</sup> 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'apprentissage<sup>1</sup> et des économies d'échelle.

<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>e 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 CO<sub>2</sub> 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'OCDE<sup>1</sup> et la commission Stern-Stiglitz<sup>2</sup>.

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 Zaouati<sup>3</sup>.

## **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-

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Stern N. et Stiglitz J.(2017), *Report of the High-Level Commission on Carbon Prices*, Carbon Pricing Leadership Coalition.

<sup>3</sup> 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'OCDE<sup>1</sup>, 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

---

<sup>1</sup> 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 collectivité<sup>1</sup>. 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

---

<sup>1</sup> 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**, CGDD

**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 CO<sub>2</sub>

**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*, 7(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 CO<sub>2</sub> 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](mailto:jean-michel.roulle@strategie.gouv.fr)**

RETROUVEZ  
LES DERNIÈRES ACTUALITÉS  
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



[www.strategie.gouv.fr](http://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**



Premier ministre

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.

# La valeur de l'action pour le climat

## COMPLÉMENTS

Rapport de la commission présidée par  
**Alain Quinet**







LA VALEUR DE L'ACTION  
POUR LE CLIMAT  
**COMPLÉMENTS**

---

Compléments au rapport de la commission présidée par  
**Alain Quinet**







## SOMMAIRE

---

<b>Première partie – Modélisation théorique</b> .....	<b>5</b>
<b>Complément 1 – Un modèle avec capital d’abattement     pour l’évaluation du carbone</b> .....	<b>7</b>
<i>Boris Le Hir, Aude Pommeret et Mathilde Salin</i>	
<b>Complément 2 – Pente de la valeur tutélaire du carbone et règle de Hotelling</b> ...	<b>43</b>
<i>Dominique Bureau</i>	
<b>Complément 3 – On the efficient growth rate of carbon price under a carbon     budget</b> .....	<b>47</b>
<i>Christian Gollier</i>	
<b>Complément 4 – Usage de la VTC et décentralisation des décisions</b> .....	<b>75</b>
<i>Émile Quinet</i>	
<b>Complément 5 – Rappels sur le taux d’actualisation</b> .....	<b>83</b>
<i>Christian Gollier et Alain Quinet</i>	
<b>Complément 6 – Les avancées récentes de la recherche en économie     du climat</b> .....	<b>91</b>
<i>Aude Pommeret</i>	
<b>Deuxième partie – Modélisation empirique</b> .....	<b>101</b>
<b>Complément 7 – Le modèle TIMES-FR</b> .....	<b>103</b>
<i>Ariane Millot et Nadia Maïzi</i>	
<b>Complément 8 – Le modèle POLES</b> .....	<b>113</b>
<i>Sylvain Cail et Quentin Bchini</i>	

<b>Complément 9 – Le modèle imaclim-R France .....</b>	<b>119</b>
<i>Meriem Hamdi-Cherif, Franck Lecocq et Julien Lefèvre</i>	
<b>Complément 10 – Le modèle NEMESIS .....</b>	<b>125</b>
<i>Baptiste Boitier, Arnaud Fougeyrollas, Gilles Koléda, Pierre Le Mouël et Paul Zagamé</i>	
<b>Complément 11 – Le modèle THREE-ME.....</b>	<b>133</b>
<i>Gaël Callonnec, Raphaël Cancé et Aurélien Saussay</i>	
<b>Complément 12 – Valeur tutélaire du carbone et environnement international de décarbonation.....</b>	<b>143</b>
<i>Patrick Criqui</i>	
<b>Complément 13 – Résumé du rapport <i>Perspectives sur les technologies Énergétiques 2017</i> de l'Agence internationale de l'énergie .</b>	<b>163</b>
<i>Executive summary traduit par Mathilde Salin</i>	
<b>Complément 14 – Coûts d'abattement du CO<sub>2</sub> et valeur tutélaire du carbone ...</b>	<b>173</b>
<i>Contribution du Commissariat général au développement durable</i>	
<b>Troisième partie – Réflexions sectorielles et prospective technologique .</b>	<b>181</b>
<b>Complément 15 – Valeur tutélaire du carbone : quelques considérations technico-économiques.....</b>	<b>183</b>
<i>François Dassa et Jean-Michel Trochet</i>	
<b>Complément 16 – Systèmes énergétiques et zéro émissions nettes : une synthèse de « Net-zero emissions energy systems » ....</b>	<b>193</b>
<i>Julien Bueb</i>	
<b>Complément 17 – Le rôle des émissions agricoles de gaz à effet de serre dans l'atteinte de l'objectif français de neutralité carbone ...</b>	<b>199</b>
<i>Stéphane De Cara, Laure Bamière et Pierre-Alain Jayet</i>	



# PREMIÈRE PARTIE

## **MODÉLISATION THÉORIQUE**

---





## COMPLÉMENT 1

# UN MODÈLE AVEC CAPITAL D'ABATTEMENT POUR L'ÉVALUATION DU CARBONE

---

Boris Le Hir<sup>1</sup>, Aude Pommeret<sup>2</sup> et Mathilde Salin<sup>3</sup>

Cette note a pour objectif de donner quelques points de repère théoriques pour explorer la valeur carbone et les conséquences de différentes approches sur le niveau initial et le profil temporel optimaux de cette valeur.

Dans les exercices précédents (Quinet, 2008), la référence théorique utilisée est un modèle stylisé d'extraction et d'utilisation des énergies fossiles pour déterminer la valeur du carbone dans le cas où la société impose une contrainte de concentration de carbone dans l'atmosphère (comme Chakravorty, Magné et Moreaux, 2006, ou Chakravorty, Moreaux et Tidball, 2008)<sup>4</sup>. Cela revient à une démarche en termes de budget carbone, qui correspond au problème classique de gestion optimale d'une ressource épuisable, les réserves initialement à disposition correspondant ici au budget carbone<sup>5</sup>. On doit la résolution du problème d'utilisation optimale d'une ressource épuisable à Hotelling (1931) qui met en évidence l'existence d'un arbitrage inter-temporel : le décideur doit être indifférent, au sens où l'utilité sociale est la même, entre retirer une unité supplémentaire du stock de ressources (c'est-à-dire émettre une unité supplémentaire de CO<sub>2</sub>) aujourd'hui ou le faire demain. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que le prix associé à ce bien croisse dans le temps au rythme du taux d'actualisation. Le prix de la ressource

---

<sup>1</sup> Département Économie, France Stratégie.

<sup>2</sup> Département Développement durable et numérique, France Stratégie.

<sup>3</sup> Département Économie, France Stratégie.

<sup>4</sup> Schubert (2008) propose aussi un modèle théorique dans lequel les dommages dus à l'accumulation de carbone sont directement pris en compte, ce qui correspond à une approche coûts/bénéfices.

<sup>5</sup> Nous négligeons ici l'absorption naturelle du CO<sub>2</sub>, ce qui est une bonne approximation dès lors que le taux d'absorption naturelle est très faible au regard du taux d'actualisation.

incorpore ainsi une rente de rareté, reflétant le caractère épuisable de la ressource et excède donc le coût marginal d'extraction même en l'absence de concurrence monopolistique.

Une fois ce budget carbone épuisé, les émissions nettes doivent rester nulles afin que le budget continue à être respecté. Dans un contexte de mise en œuvre pratique du respect d'un budget carbone très restreint conduisant nécessairement à ne plus émettre à court ou moyen terme, **l'efficacité politique peut conduire à communiquer sur les ambitions de flux à des dates données, comme l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. Ces objectifs reposent cependant sur une transcription d'un budget carbone qui lui-même s'appuie sur une évaluation des dommages probables qui peuvent être générés.**

Par ailleurs, les évaluations de valeurs carbone ont très largement recours à des modèles empiriques de grande ampleur. Trois grandes catégories de modèles sont utilisées pour les évaluations de valeurs carbone : les modèles d'évaluation intégrée (IAM) qui s'inscrivent en général dans une approche coût-bénéfice, les modèles technico-économiques et les modèles macroéconomiques (la commission Quinet utilisant ces deux derniers). **Les simulations de ces modèles empiriques, quelle que soit leur nature (modèles technico-économique ou macroéconomique), révèlent i) l'importance des investissements dans la mise en œuvre de la transition vers une économie bas carbone et ii) l'existence de coûts marginaux d'abattement fortement croissants au fur et à mesure que l'on s'approche de la neutralité carbone.** Si l'abattement est principalement réalisé grâce à de nouveaux investissements, atteindre des émissions nulles à un horizon donné ou respecter un budget carbone peut se réduire à l'installation d'une capacité d'abattement<sup>6</sup> suffisante. Le problème devient alors celui de l'accumulation optimale d'un capital d'abattement coûteux. D'une part, nous intégrons des coûts d'ajustement qui incitent à étaler l'effort d'abattement dans le temps : il est coûteux de réaliser l'investissement en une seule fois et cela incite l'investisseur à ne pas réaliser les efforts d'abattement juste avant la date à laquelle les émissions doivent devenir nulles. C'est une façon simple d'intégrer les considérations récentes sur les coûts marginaux d'abattement (Vogt Schilb *et al.*, 2018), selon lesquelles exercer tôt des options de réduction d'émissions peut être justifié par le fait que les investissements ne peuvent pas être déployés immédiatement et doivent par conséquent être anticipés. Nous prenons aussi en compte l'observation selon laquelle plus l'économie est avancée dans l'abattement, plus les nouveaux investissements à réaliser pour réduire les émissions sont coûteux, ce qui au contraire incite à retarder au maximum la réalisation des investissements. Enfin, nous distinguons deux types de technologie d'abattement. La première s'apparente à une technologie de dépollution : les

---

<sup>6</sup> On considère que la « capacité d'abattement » recouvre tous les investissements permettant de réduire les émissions de GES, telles par exemple l'installation d'une pompe à chaleur, ou l'isolation thermique d'un logement.



émissions résultent du PIB (croissant dans le temps) auquel est attaché un coefficient d'émission constant et l'investissement en capital d'abattement permet de réduire ces émissions. Pour la seconde, l'investissement en abattement permet de réaliser du découplage, c'est-à-dire de réduire le coefficient d'émission ou encore l'intensité énergétique de la production. Nous résolvons successivement deux modèles qui se distinguent par la technologie d'abattement retenue, en considérant que dans la réalité comme dans les modèles de simulation de ce rapport, la technologie d'abattement est mixte, dans le sens où elle comprend à la fois de la dépollution et de la réduction d'intensité énergétique. Les résultats obtenus par les deux modèles fournissent ainsi des corridors à l'intérieur desquels doivent se trouver les trajectoires optimales dans le cas d'une technologie mixte. La résolution du modèle dynamique permet d'obtenir des trajectoires optimales pour la valeur du carbone, la valeur marginale de la capacité d'abattement, l'investissement et les émissions.

Dans la suite de ce complément, nous présentons les hypothèses du modèle dans la première section, suivies des résolutions sous les hypothèses alternatives de technologie de dépollution ou de découplage dans la section 2. Le modèle est ensuite calibré dans la troisième section afin de proposer des trajectoires optimales pour les émissions, l'investissement, la valeur carbone et la valeur du capital d'abattement. La section 4 conclut et propose des pistes d'extension.

## 1. Un modèle d'investissement optimal en capital d'abattement

On considère tout d'abord que le flux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) mesuré en tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent (tCO<sub>2</sub>e) en  $t$  est une fonction du PIB en  $t$ ,  $Y_t$ , et de la capacité d'abattement installée,  $A_t$ , qui correspond aux investissements faits par les agents économiques (ménages, entreprises ou acteurs institutionnels) dans le but de réduire leurs émissions (par exemple, l'achat d'un véhicule électrique ou d'une pompe à chaleur, l'adoption d'une énergie décarbonée ou l'isolation de bâtiments) :

$$E_t = f(Y_t, A_t), \quad (1)$$

La fonction d'émissions  $f$  peut prendre au moins deux formes différentes, selon le type de capacité d'abattement considéré (la réalité étant probablement entre les deux) :

- Tout d'abord, **on peut considérer  $A_t$  comme une technologie affectant l'intensité polluante  $E/Y$** , qui va donc permettre de décorrélérer les émissions de GES du PIB au fur et à mesure de son déploiement. Si les capacités d'abattement étaient uniquement de ce type, la croissance du PIB ne requerrait pas d'augmenter les capacités d'abattement de même type que celles déjà installées pour compenser les nouvelles émissions de GES induites par la croissance de la production. Prenons pour exemple les investissements nécessaires à un changement dans les méthodes

de travail : si le télétravail était adopté massivement, les coûts de cette adaptation seraient supportés une seule fois (investissements dans des nouvelles organisations de production, dans des grandes infrastructures, dans des nouvelles formes d'urbanisation par exemple) et ne devraient pas (ou peu) être augmentés avec la croissance du PIB. Une technologie de ce type participerait ainsi au découplage de la production et des émissions de GES. Afin de décrire le fonctionnement d'une telle technologie, on peut écrire la fonction d'émissions de la manière suivante :

$$E_t = Y_t(\bar{A} - A_t), \quad (2)$$

Les émissions sont ici une fonction du PIB et d'un coefficient de couplage des émissions à la production,  $(\bar{A} - A_t)$ , qui se réduit à mesure que le stock de capital d'abattement installé en t *par unité de PIB*,  $A_t$ , se rapproche de la cible  $\bar{A}$ , elle aussi en tCO<sub>2</sub>e par unité de PIB. Ainsi, plus on a investi dans le capital d'abattement, plus les émissions de GES, pour un niveau de PIB donné, sont faibles. L'investissement permet ainsi de découpler le niveau d'émission du PIB.

Néanmoins, il est peu réaliste d'envisager que toutes les technologies d'abattement sont de ce type. En effet, si l'on veut atteindre des émissions nulles, on peut penser que l'augmentation de la production nécessitera d'augmenter en parallèle les capacités d'abattement. Il existe donc aussi des moyens de réduction des émissions de type « technologie de dépollution », ce qui implique de considérer une deuxième forme fonctionnelle pour la fonction d'émissions.

- Il est très probable que la croissance de la production mène les agents à devoir continûment accroître leurs investissements dans les technologies d'abattement : dans ce cas, l'abattement s'apparente davantage à de la dépollution. Par exemple, si tous les véhicules thermiques étaient remplacés par des véhicules électriques ou à hydrogène à l'année t et que la production augmentait entre l'année t et l'année t+1, il serait probablement nécessaire d'investir à nouveau dans des véhicules électriques ou à hydrogène afin de maintenir le découplage entre PIB et émissions réalisé par l'investissement en t. En effet, l'augmentation de la production nécessiterait certainement des moyens de transport des marchandises plus nombreux : il faudrait donc investir à nouveau dans les véhicules bas carbone afin d'éviter le retour de véhicules thermiques qui augmenteraient de nouveau le coefficient de couplage entre émissions et PIB. Si toutes les technologies sont de ce type, le flux d'émission de GES mesuré en tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent (tCO<sub>2</sub>e) en t est alors égal à :

$$E_t = Y_t\bar{A} - A_t, \quad (3)$$

Dans cette spécification de la fonction d'émissions, une augmentation du PIB entraîne l'augmentation de la cible de réduction des émissions à atteindre, car  $\bar{A}$  correspond au

coefficient de pollution. Remarquons par ailleurs que  $A_t$  représente toujours la capacité d'abattement mais *n'est plus exprimée par unité de PIB*<sup>7</sup>.

Enfin, on notera que dans notre modèle la croissance n'est pas endogène. Le PIB peut donc être réécrit :

$$Y_t = Y_0 e^{gt},$$

où le taux de croissance,  $g$ , est exogène. Cependant, il est probable que l'investissement dans les capacités d'abattement mène les agents économiques à réduire leurs investissements dans d'autres types de capitaux ce qui aurait éventuellement un effet négatif sur la croissance économique, mais n'est pas pris en compte dans le présent modèle<sup>8</sup>.

Afin de réduire les émissions de GES, il est ensuite nécessaire d'investir dans des capacités d'abattement. Le stock  $A_t$  s'accumule selon la dynamique suivante :

$$\dot{A}_t = a_t - \delta A_t, \quad (4)$$

où  $a_t$  est l'investissement en abattement en  $t$  et  $\delta$  est le taux de dépréciation du capital d'abattement. Le coût de cet abattement brut des émissions est défini par :

$$c(a, A) = \frac{\alpha}{2} a_t^2 + \beta A_t, \quad (5)$$

avec  $\beta, \alpha > 0$ .

La **convexité par rapport à  $a_t$**  permet de prendre en compte les coûts d'ajustement qui incitent à étaler l'effort d'abattement dans le temps. C'est une façon simple d'intégrer les considérations récentes sur les coûts marginaux d'abattement (Vogt Schilb *et al.*, 2018), selon lesquelles exercer tôt des options de réduction d'émissions peut être justifié par le fait que les investissements ne peuvent pas être déployés immédiatement<sup>9</sup>.

La **présence du stock  $A_t$**  dans la fonction de coût (5) permet de rendre les efforts de plus en plus coûteux au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'objectif (ce qui illustre le fait que les agents font les investissements les moins chers en priorité. La spécification retenue, intègre, *via* un coût fixe fonction du stock  $A_t$ , le fait que s'approcher de l'objectif rend l'abattement plus coûteux, tout en lissant un effet qui dans la réalité est

<sup>7</sup> On peut noter que  $A_t$  n'est pas exprimée dans les mêmes unités selon la technologie d'abattement retenue, mais, sans que cela porte à conséquence, nous utiliserons la même notation dans la suite de la présentation du modèle afin de simplifier l'exposition.

<sup>8</sup> Faire en sorte que  $g$  soit déterminé par le modèle et non pris comme une donnée permettrait de tester cette intuition et pourrait être une extension du modèle proposé ici.

<sup>9</sup> Par exemple, une politique visant à effectuer la rénovation thermique d'un grand nombre de bâtiments sur une période très courte serait probablement confrontée à un manque de main-d'œuvre susceptible d'entraîner une forte augmentation des coûts.

probablement discontinu (passage au véhicule électrique, génération d'électricité complètement décarbonée). Toutefois, un inconvénient de cette spécification est qu'elle n'associe pas un coût nul à un investissement nul. Il est donc nécessaire de s'assurer que l'investissement  $a_t$  ne s'annule pas ou n'est pas « trop petit » pour garantir la pertinence de cette fonction.

Le programme de l'agent consiste alors à minimiser les coûts actualisés à l'infini sous la contrainte d'un stock  $\bar{S}$  (un budget carbone). La date  $T$  à laquelle ce stock est épuisé est alors endogène.

## 2. Accumulation optimale de technologies permettant la dépollution

Sous la contrainte d'un budget carbone,  $\bar{S}$ , on considère un stock de GES  $S_t$  qui croît avec les émissions de chaque période et s'accumule donc selon la dynamique suivante<sup>10</sup> :

$$\dot{S}_t = E_t$$

L'accumulation du stock  $A_t$  et le coût de l'abattement sont toujours donnés par les équations (4) et (5) respectivement. Le programme du planificateur est alors :

$$\min_{a_t,} \int_0^{+\infty} e^{-\rho t} c(a_t, A_t) dt$$

$$\dot{A}_t = a_t - \delta A_t$$

$$\dot{S}_t = E_t$$

$$S_t \leq \bar{S}, Y_0 e^{gt} \bar{A} \geq A_t$$

$$A_0, S_0, \bar{A} \text{ et } \bar{S} \text{ donnés}$$

où  $\rho$  est le taux d'actualisation. On note  $\lambda_t$  le prix implicite du stock de capital d'abattement qui est le multiplicateur associé à la contrainte d'accumulation du stock de capital d'abattement et  $\mu_t$  le prix implicite du stock de carbone. On définit aussi  $\omega \geq 0$ , le multiplicateur associé à la contrainte sur le stock de CO<sub>2</sub>, et  $\nu \geq 0$ , le multiplicateur associé à la contrainte sur le stock de capital d'abattement.

<sup>10</sup> Les émissions sont nettes des puits et nous considérons que l'assimilation proportionnelle au stock de GES est suffisamment faible pour être ignorée.

## 2.1. Technologie de dépollution

Dans le cas d'une technologie de dépollution / d'abattement simple (voir équation (3)), le lagrangien dynamique associé au problème s'écrit :

$$L_t = -\frac{\alpha}{2} a_t^2 - \beta A_t + \lambda_t (a_t - \delta A_t) - \mu_t (Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t) + \omega (\bar{S} - S) + \nu (Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t)$$

Les conditions nécessaires d'optimalité lorsque le cap n'est pas encore atteint ( $\omega = \nu = 0$ ) s'écrivent :

$$\frac{\partial c(a, A)}{\partial a} = \alpha a = \lambda,$$

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \rho + \delta + \frac{\beta}{\lambda} - \frac{\mu}{\lambda}$$

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = \rho$$

La première équation indique que le coût marginal de l'investissement en abattement est égal à son prix implicite.

La deuxième équation indique le taux de croissance du prix implicite de la capacité d'abattement. Il correspond au coût d'usage, auquel on retranche  $\mu/\lambda$ . En effet, le coût d'usage du capital comprend :

- le taux de préférence pour le présent  $\rho$  ;
- le taux de dépréciation  $\delta$  du stock de capital d'abattement puisqu'il est nécessaire de renouveler la capacité d'abattement ;
- un élément rendant compte du changement de prix de l'investissement, car la société doit investir dans des technologies de plus en plus coûteuses au fur et à mesure que les émissions se réduisent et que les émissions résiduelles s'avèrent de plus en plus difficiles à abattre. Cet effet provient de la présence du paramètre  $\beta$  dans la fonction de coût de l'équation (5).

Est retranché à ce coût d'usage  $\mu/\lambda$ , qu'on peut interpréter comme la valeur sociale relative des stocks d'abattement et de GES (rente associée à la valorisation des émissions évitées) et qui indique la contribution du stock d'abattement à la réduction du stock de GES.

On obtient les trajectoires optimales suivantes (voir annexe, section 1) :

$$\mu_t = \mu_0 e^{\rho t}$$

$$\lambda_t = \bar{x} e^{(\rho+\delta)t} + \frac{\mu_0}{\delta} e^{\rho t} - \frac{\beta}{\rho + \delta}$$

$$S_t = \frac{Y_0}{g} (e^{gt} - 1) \bar{A} + \frac{\bar{z}}{\delta} (e^{-\delta t} - 1) - \frac{\bar{x}}{\alpha(\rho + 2\delta)(\rho + \delta)} (e^{(\rho+\delta)t} - 1) - \frac{\mu_0}{\delta\alpha(\delta + \rho)\rho} (e^{\rho t} - 1) + \frac{\beta t}{\alpha\delta(\rho + \delta)} + S_0$$

où  $\mu_0$ ,  $\bar{z}$  et  $\bar{x}$  sont des constantes qui peuvent être identifiées grâce aux conditions suivantes :  $A_0$ ,  $A_T$ , et la continuité de  $\lambda_t$  en  $T$ .

La résolution complète de ce modèle est effectuée dans l'annexe (section 1). En particulier, la constante  $\bar{x}$  est négative, ce qui ouvre la voie à une dynamique non monotone de  $\lambda_t$  et donc de l'investissement  $a_t$  (et ce sera bien le cas dans nos illustrations numériques dans la section suivante). Par ailleurs, on observe que la taille du budget carbone (c'est-à-dire la valeur de  $\bar{S}$ ) n'a pas d'effet sur le taux de croissance de  $\mu_t$  et de  $\lambda_t$ , mais sur le point de départ de ces valeurs.

Après la date  $T$ , les dynamiques des deux variables de co-état deviennent (voir annexe) :

$$\lambda_t = \alpha Y_T e^{g(t-T)} \bar{A} (g + \delta)$$

$$\mu_t - v_t = \beta + (\rho + \delta - g) \alpha Y_T e^{g(t-T)} \bar{A} (g + \delta)$$

où  $v_t$  est le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte  $A_t \leq Y_0 e^{gt} \bar{A}$  (après  $T$ , il est nécessaire d'avoir  $A_t = Y_0 e^{gt} \bar{A}$ , soit  $v_t \geq 0$  pour que les émissions soient nulles). Cela signifie qu'une fois le budget carbone épuisé et la neutralité carbone atteinte grâce au capital d'abattement installé, le prix implicite du capital d'abattement doit croître au même rythme que la production afin de compenser les nouvelles émissions induites par la croissance économique. Ce résultat est induit par l'hypothèse formulée dans cette section selon laquelle les technologies de décarbonation adoptées sont de type « dépollution » et ne permettent donc pas de découpler la production et les émissions.

## 2.2. Technologie affectant l'intensité polluante

Dans le cas d'une technologie affectant l'intensité polluante, c'est-à-dire permettant d'opérer un découplage entre le PIB et les émissions, le lagrangien dynamique associé au problème s'écrit :

$$L_t = -\frac{\alpha}{2} a_t^2 - \beta A_t + \lambda_t (a_t - \delta A_t) - \mu_t Y_0 e^{gt} (\bar{A} - A_t) + \omega (\bar{S} - S) + \nu Y_0 e^{gt} (\bar{A} - A_t)$$

Les conditions nécessaires d'optimalité lorsque le cap n'est pas encore atteint ( $\omega = \nu = 0$ ) s'écrivent :

$$\frac{\partial c(a, A)}{\partial a} = \alpha a = \lambda,$$

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \rho + \delta + \frac{\beta}{\lambda} - Y_0 e^{gt} \frac{\mu}{\lambda}$$

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = \rho$$

Comme dans le cas d'une technologie de dépollution, on retrouve (voir la deuxième équation) que le taux de croissance du prix implicite de la capacité d'abattement correspond au coût d'usage, auquel on retranche  $\mu/\lambda$ . La seule modification notable réside dans la prise en compte de  $\mu/\lambda$ , la contribution du stock d'abattement à la réduction du stock de GES, qui apparaît avec un poids  $Y_0 e^{gt}$  qui croît dans le temps.

De nouveau,  $\mu_t$  suit une règle de Hotelling et se rapproche de la conception généralement admise de la valeur du carbone, tandis que  $\lambda_t$  croît à présent à un rythme qui dépend du taux de croissance de l'économie, ce qui n'était pas le cas précédemment. La résolution complète de ce modèle est effectuée dans l'annexe (section 2). On retrouve la possibilité d'une dynamique non monotone pour  $\lambda_t$  et l'investissement.

Après la saturation du budget carbone et de la neutralité carbone à la date endogène T, les dynamiques des deux variables de co-état deviennent (voir annexe, section 2) :

$$\lambda_t = \alpha \delta \bar{A} = \bar{\lambda}$$

l'investissement  $a_t = \delta \bar{A}$  est constant aussi et

$$\mu_t - \nu_t = e^{-g(t-T)} [\beta + (\rho + \delta) \alpha \delta \bar{A}] / Y_T$$

qui décroît dans le temps. Ainsi, dans le cas où la technologie est telle que l'intensité polluante du PIB est progressivement réduite, il n'est plus nécessaire de faire croître le prix implicite du capital d'abattement une fois qu'une quantité suffisante d'investissements a été réalisée pour atteindre la neutralité carbone. En effet, en T, le découplage entre le PIB et les émissions est total : la production d'un euro supplémentaire de richesse n'engendre plus aucune émission.

### 3. Illustration numérique

Dans cette section, les modèles théoriques avec technologie de dépollution d'une part et avec une technologie qui réduit l'intensité polluante d'autre part sont calibrés de la façon la plus réaliste possible et cohérente avec les modèles de simulation utilisés dans ce rapport. La sensibilité aux valeurs retenues pour les paramètres est ensuite testée en faisant varier ces dernières suffisamment pour couvrir les plages vraisemblables. Cela permet de comparer la sensibilité des différentes variables d'intérêt (date optimale pour la neutralité carbone, trajectoires d'investissement, d'émissions, de valeur du carbone) aux différents paramètres.

Le taux d'actualisation est choisi égal à 4,5 % comme dans le reste du rapport. Le taux de dépréciation, fixé à 4,35 %, est obtenu<sup>11</sup> en pondérant les taux de dépréciation des différents secteurs proposés dans Vogt-Schilb *et al.* (2018). Le taux de croissance du PIB est calibré à 1,6 %, conformément aux résultats des modèles de simulation utilisés dans ce rapport. Le PIB de l'année 0 est celui qui a été observé en 2015 par l'Insee<sup>12</sup>, soit 2 173,69 milliards d'euros. Le stock d'abattement de 2015 est supposé nul et  $\bar{A}$  est calculé comme le ratio entre les émissions de 2015 (458 MtCO<sub>2</sub>) et le PIB de la même année.

La fonction de coût d'abattement est calibrée à partir des résultats du modèle TIMES dans le cas d'un puits de carbone de 95 MtCO<sub>2</sub>. Afin d'être cohérent avec la logique du modèle TIMES, nous déterminons dans l'annexe (section 3), en fonction des paramètres de la fonction de coût, l'expression de la trajectoire du prix du carbone  $\mu_t$  qui permet au producteur de choisir la trajectoire d'émission imposée dans l'exercice du présent rapport. Cette trajectoire du prix carbone doit donc correspondre à celle obtenue par le modèle TIMES et les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  sont identifiés en égalisant notre  $\mu$  théorique à la valeur du carbone obtenue par TIMES en 2030 et en 2040 pour un taux de croissance spontané des émissions nul<sup>13</sup>. Soulignons par ailleurs que  $\alpha$  et  $\beta$  diffèrent selon qu'est considérée une technologie de dépollution ou une technologie réduisant l'intensité polluante. Enfin, afin d'autoriser une comparaison avec les résultats obtenus lorsqu'une trajectoire d'émission linéaire est imposée, le budget carbone à partir de 2015 est choisi égal à celui obtenu dans le cas d'une réduction linéaire des émissions à partir de 2015

---

<sup>11</sup> Le taux de dépréciation est calibré sur la structure actuelle de l'économie et n'est donc pas dynamique. En revanche, on peut imaginer que la transition vers une économie bas carbone développe massivement certains équipements dont les taux de dépréciation seront différents des équipement existants, modifiant ainsi au cours du temps le taux de dépréciation moyen du capital.

<sup>12</sup> [www.insee.fr/fr/statistiques/2830613](http://www.insee.fr/fr/statistiques/2830613).

<sup>13</sup> C'est une hypothèse existant dans TIMES.



pour arriver à zéro en 2050<sup>14</sup>. Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs des différents paramètres :

$\rho$	$\delta$	$g$	$Y_0$	$\bar{A}$	Tech. de dépollution		Découplage		$\bar{S}$
					$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$	
4,5 %	4,35 %	1,6 %	2 173,69 Mds€	$2,08 \cdot 10^{-4}$ tCO <sub>2</sub> e/€	$1,05 \cdot 10^{-4}$	180,67	$5,1 \cdot 10^{20}$	$3,98 \cdot 10^{14}$	$8 \cdot 10^9$ tCO <sub>2</sub> e

### 3.1. Modèle avec dépollution

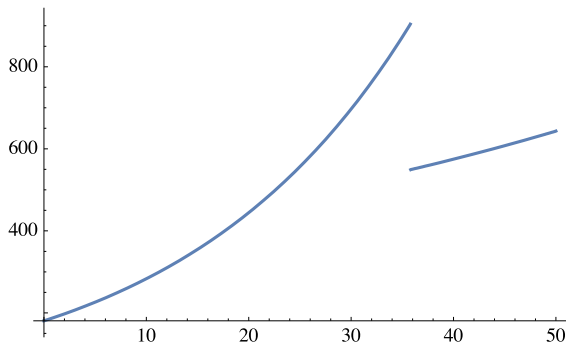
Avec ce calibrage pour les paramètres, dans un cadre d'optimisation de la consommation du budget carbone, les émissions deviennent nulles au bout de 35,8 ans, ce qui amène la date optimale pour la neutralité carbone à presque 2051, soit une date très proche de celle fixée par l'objectif politique français. Par ailleurs, les profils temporels du prix implicite du carbone, du prix implicite de la capacité d'abattement, de la capacité d'abattement et des émissions sont présentés dans les graphiques ci-dessous. On remarque en particulier :

- la forme légèrement concave puis convexe, donc avec un point d'inflexion (mais pas très éloignée d'une relation linéaire), du profil temporel des émissions ;
- la non-monotonie du prix implicite de la capacité d'abattement (qui implique celle des investissements<sup>15</sup> puisque  $a_t = \lambda_t / \alpha$ ) : comme n'importe quelle capacité d'investissement,  $a_t$  a tendance à décroître au fur et à mesure de l'accumulation. Toutefois, la capacité d'abattement a la caractéristique supplémentaire de dépendre positivement du prix du carbone, qui, lui, croît dans le temps. On observe que ce dernier effet prévaut dans les premières périodes, tandis que le premier l'emporte à partir d'environ 2045 ;
- la non-continuité du prix implicite du carbone, net du multiplicateur de Lagrange  $v(t)$ . Cela provient du fait que la variable de stock de carbone est contrainte à un niveau particulier à la date T de changement de régime. Par ailleurs,  $\mu(t) - v(t)$  continue à croître après 2051, mais à un rythme moins soutenu.

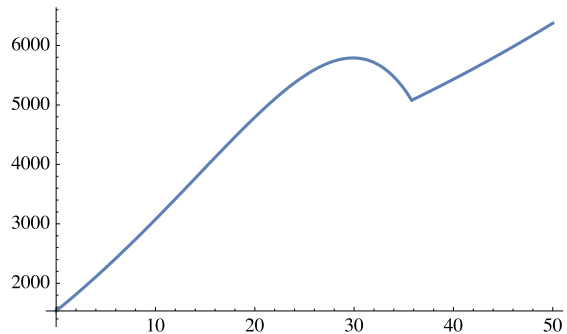
<sup>14</sup> On peut remarquer que ce budget carbone n'est pas très éloigné d'un budget carbone de 7 092 MtCO<sub>2</sub> calculé comme suit : la France représente environ 0,9 % des émissions mondiale, ce qui conduit à lui octroyer un budget carbone de 9 000 MtCO<sub>2</sub> en 2011, auquel on a soustrait les émissions entre 2011 et 2015 pour obtenir le budget carbone en 2015.

<sup>15</sup> Ce résultat est cohérent avec celui de Vogt-Schilb et Hallegatte (2018).

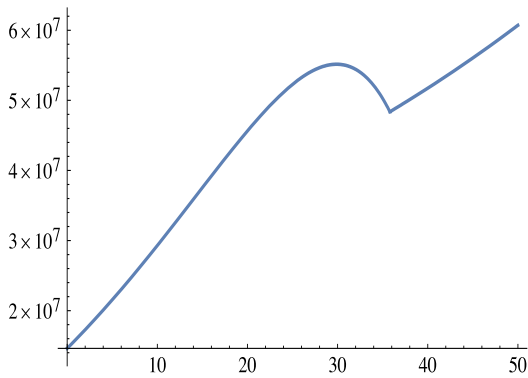
**Évolution temporelle de  $\mu(t)-v(t)$  en €/tCO<sub>2</sub>e entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)**



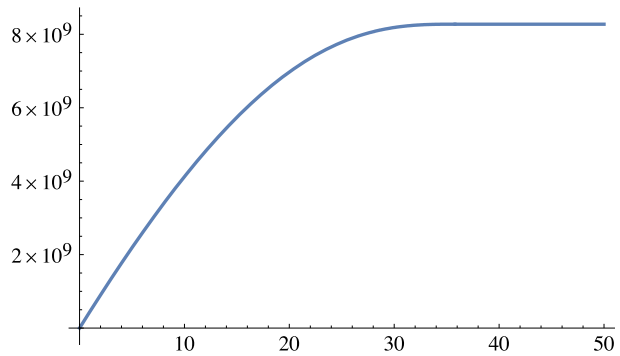
**Évolution temporelle de  $\lambda(t)$  €/tCO<sub>2</sub>e entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)**



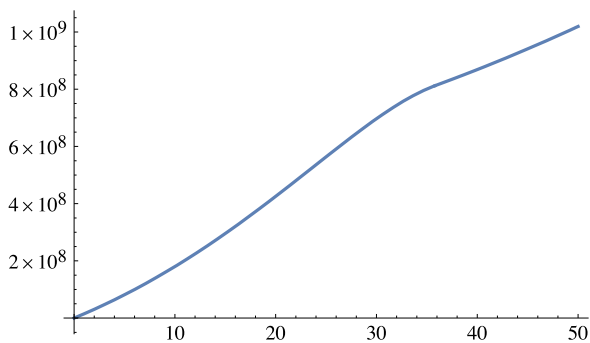
**Évolution temporelle de  $a(t)$  en tCO<sub>2</sub>e entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)**



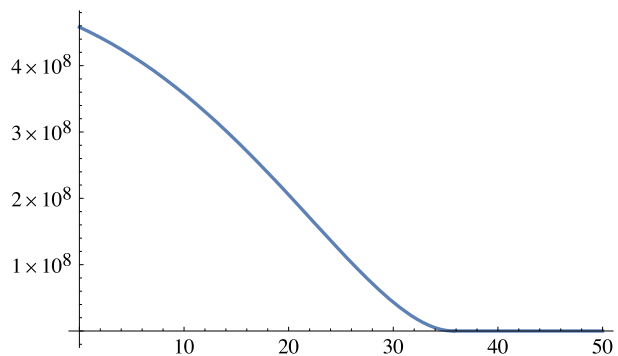
**Évolution temporelle de  $S(t)$  en tCO<sub>2</sub>e entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)**



**Évolution temporelle de  $A(t)$  en tCO<sub>2</sub>e entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)**



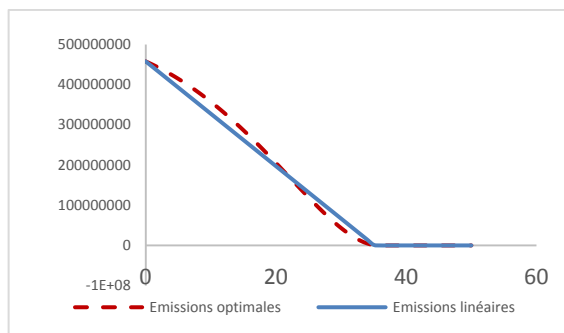
**Évolution temporelle de  $E(t)$  en tCO<sub>2</sub>e entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)**



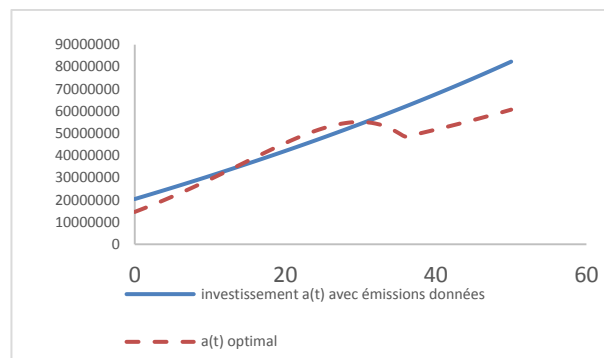
Les graphiques ci-dessous comparent l'investissement et la valeur de  $\mu(t)-v(t)$  (on rappelle que jusqu'à T,  $v(t)=0$ ) selon que la trajectoire est optimale ou imposée et

linéaire<sup>16</sup>, pour un même budget carbone. On remarque en particulier la forte proximité des trajectoires d'émissions.

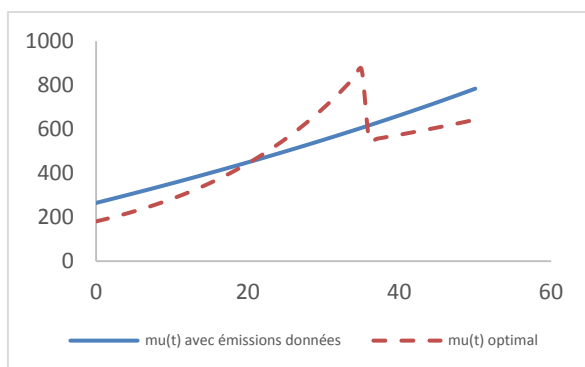
Comparaison des émissions



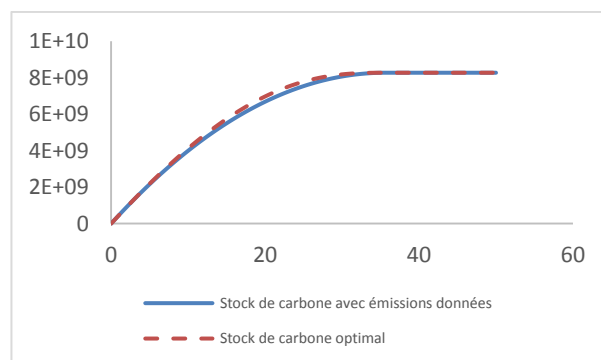
Comparaison des investissements



Comparaisons des  $\mu(t)$



Comparaison des  $S(t)$



Un exercice de dynamique comparative permet de tester la sensibilité des résultats aux valeurs choisies pour le calibrage<sup>17</sup>. Les figures de l'annexe (section 4) montrent que :

- la date optimale de neutralité carbone est assez peu sensible aux paramètres, à l'exception du taux d'actualisation (pour  $\rho$  entre 2,5 % et 6 %, elle varie entre 2048 et 2057, ce qui reste encore assez proche de 2050) et de la contrainte de budget carbone (si ce dernier varie de plus ou moins 10 %, la date optimale passe de 2048 à 2053) ;

<sup>16</sup> Voir le modèle de l'annexe (section 3).

<sup>17</sup> On fait varier le taux de croissance de l'économie entre 1,2 % et 2 %, la dépréciation entre 0,008 et 0,067 (ce sont les variables extrêmes utilisées dans Vogt Schilb *et al.*, 2018, respectivement pour la forêt et le transport), le budget carbone entre (-10 %) et (+10 %) la valeur initiale utilisée pour le calibrage et le taux d'actualisation entre 2,5 % et 6 %.

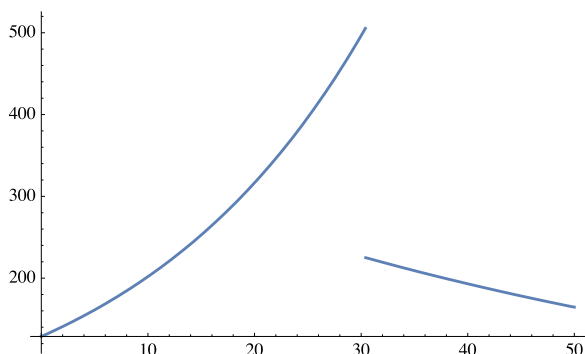
- la trajectoire d'émissions est inchangée pour les plages choisies pour  $g$  et le taux de dépréciation. Elle est davantage modifiée pour des changements du budget carbone (à chaque date, elle est plus haute pour un budget carbone plus élevé) ou du taux d'actualisation (les trajectoires se croisent, avec des émissions initiales plus élevées lorsque le taux d'actualisation est plus fort) ;
- l'investissement (ainsi que  $\lambda(t)$ ) réagit significativement au taux de croissance de l'économie (on rappelle qu'on considère ici une technologie de dépollution), ainsi qu'au taux de dépréciation. Une croissance de 2 % plutôt que 1,6 % conduit à des investissements 22,5 % plus élevés en 2050, tandis que si la dépréciation est de 6,7 % (comme dans le secteur des transports, d'après Vogt Schilb *et al.*, 2018) plutôt que de 4,3 %, l'investissement est 40 % plus élevé en 2050. Les effets sont moins impressionnants lorsque le budget carbone ou le taux d'actualisation sont modifiés ;
- le taux de croissance de la valeur carbone étant égal au taux d'actualisation, ce dernier paramètre influence directement la trajectoire de  $\mu(t)$ . On peut aussi remarquer que, en niveau,  $\mu(t)$  est davantage affectée par les modifications envisagées pour le taux de dépréciation que par celles considérées pour  $g$ .

### 3.2. Modèle avec réduction de l'intensité polluante

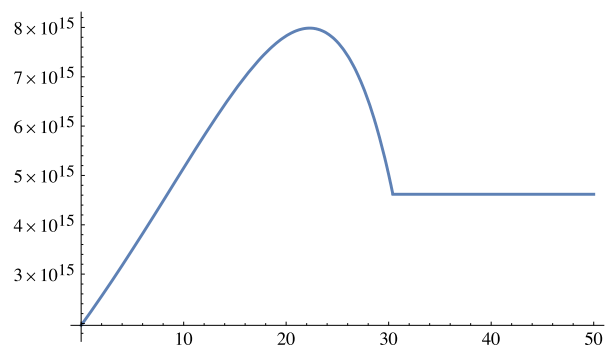
Avec le calibrage proposé pour les paramètres, les émissions deviennent nulles au bout de 30,3 ans, soit une date optimale pour la neutralité carbone aux alentours de 2045, ce qui, de nouveau, est relativement proche de l'horizon fixé par l'objectif politique français. Les profils temporels du prix implicite du carbone, du prix implicite de la capacité d'abattement, de la capacité d'abattement et des émissions sont présentés dans les graphiques ci-dessous. On retrouve les caractéristiques observées dans le cas d'une technologie de dépollution, en particulier :

- une trajectoire des émissions quasiment linéaire malgré une forme présentant un point d'inflexion ;
- la non-monotonie du prix implicite de la capacité d'abattement et de l'investissement, qui présentent chacun une courbe en cloche ; cependant, le point où un maximum est atteint se situe plus tôt que dans le cas d'une technologie de dépollution (2035 contre 2045).

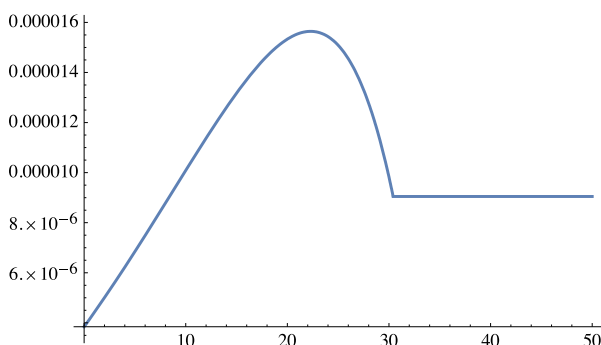
Évolution temporelle de  $\mu(t)-v(t)$  en €/tCO<sub>2</sub>e  
entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)



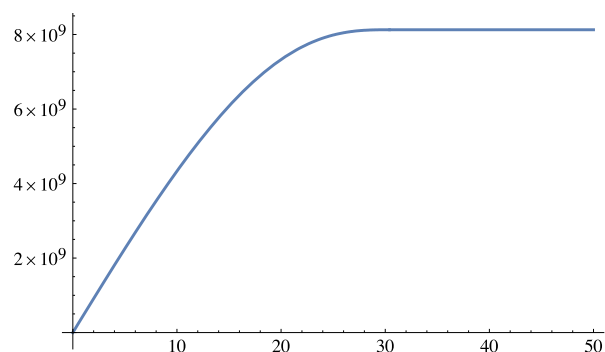
Évolution temporelle de  $\lambda(t)$  en €<sup>2</sup>/tCO<sub>2</sub>e  
entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)



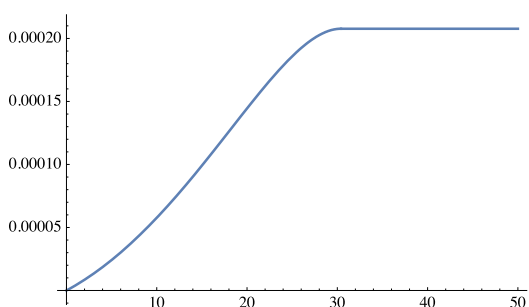
Évolution temporelle de  $a(t)$  en tCO<sub>2</sub>e/€  
entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)



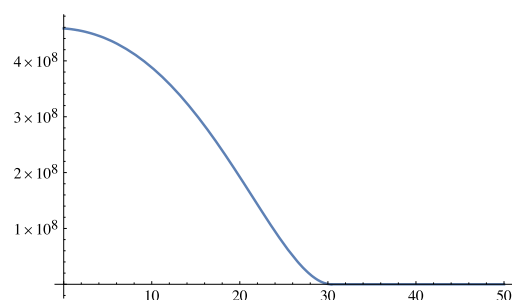
Évolution temporelle de  $S(t)$  en tCO<sub>2</sub>e  
entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)



Évolution temporelle de  $A(t)$  tCO<sub>2</sub>e/€  
entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)



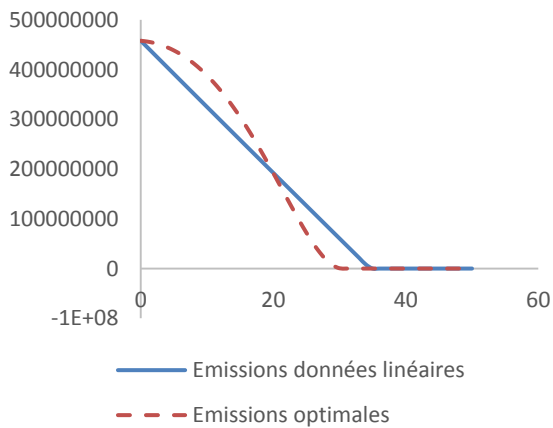
Évolution temporelle de  $E(t)$  en tCO<sub>2</sub>e  
entre 2015 et 2065 (t=0 en 2015)



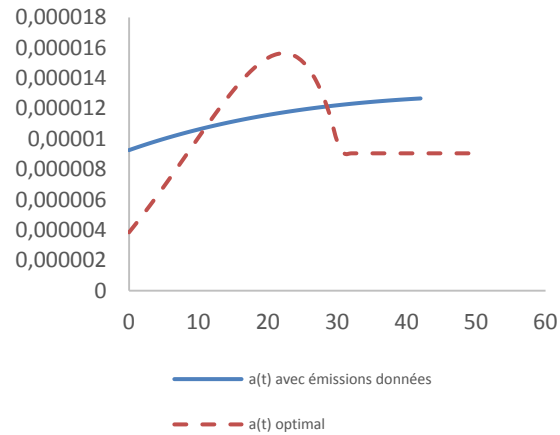
On compare de nouveau l'investissement et la valeur de  $\mu(t)-v(t)$  (voir les graphiques ci-dessus). Même si la trajectoire optimale d'émissions présente toujours un point d'inflexion, la proximité des trajectoires d'émissions est moins flagrante que dans le cas d'une technologie de dépollution. On peut aussi remarquer la pente négative de la valeur du carbone dans le cas où la trajectoire d'émissions est imposée. Il faut cependant rappeler que dans la réalité comme dans les modèles de simulation utilisés dans ce

rapport, la technologie d'abattement combine de la dépollution avec de la réduction d'intensité polluante, ce qui suggère des résultats intermédiaires, entre ceux obtenus dans les modèles avec chaque type de technologie.

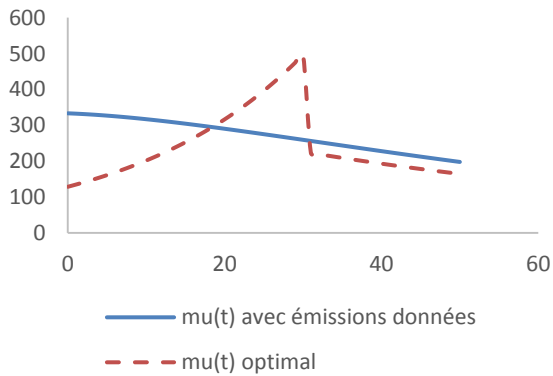
**Comparaison des émissions**



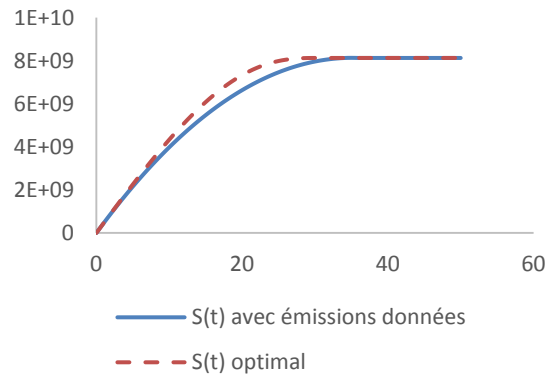
**Comparaison des investissements**



**Comparaisons des  $\mu(t)$**



**Comparaison des S(t)**



On conduit un exercice de dynamique comparative similaire à celui réalisé pour la technologie de dépollution afin de tester la sensibilité des résultats aux valeurs choisies pour le calibrage. En particulier, les mêmes plages de valeurs pour les paramètres sont considérées. Les figures de l'annexe 5 montrent de nouveau que la date optimale pour la neutralité carbone varie peu, seulement entre 2045 et 2048 (pour les plages envisagées pour le budget carbone ou le taux d'actualisation) et que la trajectoire des émissions n'est un peu sensible qu'au budget carbone et au taux d'actualisation. Enfin, la trajectoire du prix implicite du carbone est peu sensible au taux de croissance de l'économie, tandis que le taux d'actualisation la modifie significativement.

## Conclusion et extensions

Nous avons proposé deux modèles d'investissement optimal : l'un suppose une technologie de dépollution tandis que l'autre intègre du découplage. La réalité ainsi que les modèles de simulation utilisés dans ce rapport se situent entre ces deux spécifications pour la technologie d'abattement. Dans les modèles étudiés, l'investissement est étalé dans le temps notamment à cause de la présence de coûts d'ajustement, mais nous prenons également en compte le fait que plus l'économie est avancée dans l'abattement, plus les nouveaux investissements à réaliser pour réduire les émissions sont coûteux. La résolution de ces modèles met en évidence l'existence d'un prix implicite du carbone et d'un prix implicite du capital d'abattement, ce qui illustre bien la duplicité d'une valeur tutélaire du carbone décrite comme une valeur de l'effort à fournir pour atteindre l'objectif climatique. Le prix implicite du capital correspond au coût du dernier système technologique permettant d'atteindre l'objectif fixé tandis que le prix implicite du carbone est le signal-prix qui conduit les agents économiques à respecter la contrainte de trajectoire d'émissions

L'un des principaux enseignements de ce modèle théorique est que le modèle d'optimisation calibré de façon réaliste conduit à une trajectoire d'émission très proche de la trajectoire linéaire qui a été imposée aux modèles de simulation utilisés dans ce rapport. Un second résultat concerne la date optimale de neutralité carbone qui se trouve entre 2045 et 2053, quels que soient le type de technologie d'abattement et les valeurs des paramètres (y compris le taux d'actualisation ou la taille du budget carbone) considérés. Nous obtenons aussi une trajectoire non monotone pour la valeur marginale de la capacité d'abattement, tandis que la valeur du carbone suit une règle de Hotelling. Ainsi, même si le taux de croissance du prix du carbone dépend uniquement du taux d'actualisation, sa valeur initiale est affectée par les caractéristiques de l'investissement dans les technologies de dépollution ou de réduction de l'intensité polluante.

Trois extensions à ce modèle pourront être développées afin de prendre en compte l'incertitude et le progrès technique, et d'endogénéiser la dynamique du PIB. Du *learning-by-doing* jouerait en effet en sens inverse de l'effet selon lequel l'abattement est de plus en plus coûteux à mesure qu'on s'approche de l'objectif (les résultats empiriques de ce rapport montrent cependant que ce dernier effet reste celui qui prédomine). L'incertitude, quant à elle, modifierait la règle de Hotelling qui s'applique à la valeur tutélaire du carbone comprise comme la valeur sociale du carbone et/ou modifierait le coût d'usage du capital qui gouverne la valeur tutélaire du carbone si on la définit comme la valeur de la capacité d'abattement. Par ailleurs, les contraintes de liquidités des investisseurs pourraient être prises en compte. Enfin, considérer un modèle de croissance permettrait de prendre en compte l'arbitrage entre investissement productif et investissement en abattement ; dans ce cas une approche coût-bénéfice serait toutefois indispensable.

## Références

Boucekkine R., Pommeret A. et Prieur F. (2013), « Optimal regime switching and threshold effects: Theory and application to a resource extraction problem under irreversibility », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 37(12), p. 2979-2997.

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

Chakravorty U., Moreaux M. et Tidball M. (2008), « Ordering the extraction of polluting non renewable resources », *American Economic Review*, vol. 98, n° 3, juin, p. 1128-1144.

Chakravorty U., Magné B. et Moreaux M. (2006), « A Hotelling model with a ceiling on the stock of pollution », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 30, p. 2875-2904.

Hotelling H. (1931), « The economics of exhaustible resources », *Journal of Political Economy*, 39, p. 137-175.

Schubert K. (2009), « La valeur du carbone : niveau initial et profil temporel optimaux », in Centre d'analyse stratégique (2009), *La valeur tutélaire du carbone*, rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Paris, La Documentation française, p. 354-373

Vogt-Schilb A., Meunier G. et Hallegatte S. (2018), « [When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of Abatement investment](#) », *Journal of Environmental Economics and Management*, 88 (March), p. 210-233.



## Annexe : résolution du modèle

### 1. Résolution avec technologie de dépollution

Le modèle est résolu dans le cas d'une technologie de dépollution / d'abattement simple (voir équation (3)). Le lagrangien dynamique associé au problème s'écrit (on omet les indices temporels) :

$$L = -\frac{\alpha}{2} a^2 - \beta A + \lambda(a - \delta A) - \mu(Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t) + \omega(\bar{S} - S) + \nu(Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t)$$

où  $\omega \geq 0$  est le multiplicateur associé à la contrainte sur le stock de CO<sub>2</sub> et  $\nu \geq 0$  est le multiplicateur associé à la contrainte sur le stock de capital d'abattement.

Les conditions nécessaires d'optimalité s'écrivent :

$$\frac{\partial c(a,A)}{\partial a} = \alpha a = \lambda, \quad (\text{a.1})$$

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \rho + \delta + \frac{\beta}{\lambda} - \frac{\mu - \nu}{\lambda} \quad (\text{a.2})$$

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = \rho + \omega/\mu \quad (\text{a.3})$$

- On étudie tout d'abord la phase  $t > T$  lorsque le cap est atteint : (a.3) donne l'expression de  $\omega$ .

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow A_t = Y_T e^{g(t-T)} \bar{A} \Rightarrow a_t = Y_T e^{g(t-T)} \bar{A} (g + \delta) \Rightarrow \lambda_t = \alpha Y_T e^{g(t-T)} \bar{A} (g + \delta)$$

et on déduit de (a.2) :

$$\mu_t - \nu_t = \beta + (\rho + \delta - g) \alpha Y_T e^{g(t-T)} \bar{A} (g + \delta)$$

- On étudie la phase  $t < T$ , lorsque le cap n'est pas encore atteint ( $\omega = \nu = 0$ ). On en déduit  $\mu_t = \mu_0 e^{\rho t}$ .

On pose  $x_t = \lambda_t e^{-(\rho+\delta)t}$  ce qui implique  $\dot{x} = \dot{\lambda}_t e^{-(\rho+\delta)t} - (\rho + \delta) \lambda_t e^{-(\rho+\delta)t}$  et donc  $\dot{x} e^{(\rho+\delta)t} = \dot{\lambda}_t - (\rho + \delta) \lambda_t = \beta - \mu_t$ , d'où :

$$x_t = \bar{x} + e^{-\delta t} \frac{\mu_0}{\delta} - e^{-(\rho+\delta)t} \frac{\beta}{(\rho+\delta)} \quad \text{avec } \bar{x} \text{ la constante d'intégration.}$$

On en déduit :

$$\lambda_t = \bar{x}e^{(\rho+\delta)t} + \frac{\mu_0}{\delta}e^{\rho t} - \frac{\beta}{\rho+\delta} \quad \text{et} \quad a_t = \frac{\bar{x}}{\alpha}e^{(\rho+\delta)t} + \frac{\mu_0}{\delta\alpha}e^{\rho t} - \frac{\beta}{\alpha(\rho+\delta)}$$

Par ailleurs,  $\dot{A} + \delta A = a$

On pose  $z_t = A_t e^{\delta t}$  ce qui implique  $\dot{z} = \dot{A}_t e^{\delta t} + \delta A_t e^{\delta t}$  et donc  $\dot{z} e^{-\delta t} = \dot{A}_t + \delta A_t = a_t$ , d'où :

$$\dot{z}_t = \frac{\bar{x}}{\alpha}e^{(\rho+2\delta)t} + \frac{\mu_0}{\delta\alpha}e^{\delta t}e^{\rho t} - \frac{\beta e^{\delta t}}{\alpha(\rho+\delta)}$$

Ce qu'on intègre pour obtenir :

$$z_t = \bar{z} + \frac{\bar{x}}{\alpha(\rho+2\delta)}e^{(\rho+2\delta)t} + \frac{\mu_0}{\delta\alpha(\delta+\rho)}e^{(\delta+\rho)t} - \frac{\beta e^{\delta t}}{\alpha\delta(\rho+\delta)}$$

avec  $\bar{z}$  la constante d'intégration.

D'où :

$$A_t = z_t e^{-\delta t} = \bar{z}e^{-\delta t} + \frac{\bar{x}}{\alpha(\rho+2\delta)}e^{(\rho+\delta)t} + \frac{\mu_0}{\delta\alpha(\delta+\rho)}e^{\rho t} - \frac{\beta}{\alpha\delta(\rho+\delta)}$$

Et comme  $\dot{S} = Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t$ , on obtient en intégrant :

$$S_t = \frac{Y_0}{g}(e^{gt} - 1)\bar{A} + \frac{\bar{z}}{\delta}(e^{-\delta t} - 1) - \frac{\bar{x}}{\alpha(\rho+2\delta)(\rho+\delta)}(e^{(\rho+\delta)t} - 1) - \frac{\mu_0}{\delta\alpha(\delta+\rho)\rho}(e^{\rho t} - 1) + \frac{\beta t}{\alpha\delta(\rho+\delta)} + S_0$$

$A_0$ ,  $\bar{A}$  et  $\bar{S}$  donnés, ainsi que la continuité de  $\lambda_t$  en T permettent d'identifier les quatre inconnues T,  $\bar{x}$ ,  $\bar{z}$  et  $\mu_0$ .

## 2. Résolution avec technologie réduisant l'intensité polluante

$$L = -\frac{\alpha}{2} a^2 - \beta A + \lambda(a - \delta A) - \mu(Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t) + \omega(\bar{S} - S) + \nu(Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t)$$

Les conditions nécessaires d'optimalité s'écrivent :

$$\frac{\partial c(a,A)}{\partial a} = \alpha a = \lambda, \quad (\text{a.4})$$

$$\frac{\dot{\lambda}}{\lambda} = \rho + \delta + \frac{\beta}{\lambda} - Y_0 e^{gt} \frac{\mu - \nu}{\lambda} \quad (\text{a.5})$$

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = \rho + \omega/\mu \quad (\text{a.6})$$

- On étudie tout d'abord la phase  $t > T$  lorsque le cap est atteint : (a.6) donne l'expression de  $\omega$ .

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow A_t = \bar{A} \Rightarrow a_t = \delta \bar{A} \Rightarrow \lambda_t = \alpha \delta \bar{A}$$

et on déduit de (a.5) :

$$\mu_t - \nu_t = e^{-g(t-T)} [\beta + (\rho + \delta) \alpha \delta \bar{A}] / Y_T$$

- On étudie la phase  $t < T$ , lorsque le cap n'est pas encore atteint ( $\omega = \nu = 0$ ). On en déduit  $\mu_t = \mu_0 e^{\rho t}$ .

On pose  $x_t = \lambda_t e^{-(\rho+\delta)t}$  ce qui implique  $\dot{x} = \dot{\lambda}_t e^{-(\rho+\delta)t} - (\rho + \delta) \lambda_t e^{-(\rho+\delta)t}$  et donc  $\dot{x} e^{(\rho+\delta)t} = \dot{\lambda}_t - (\rho + \delta) \lambda_t = \beta - \mu_t Y_0 e^{gt}$ , d'où :

$$x_t = \bar{x} - e^{(g-\delta)t} \frac{\mu_0 Y_0}{g-\delta} - e^{-(\rho+\delta)t} \frac{\beta}{(\rho+\delta)}$$

avec  $\bar{x}$ , la constante d'intégration.

On en déduit :

$$\lambda_t = \bar{x} e^{(\rho+\delta)t} + \frac{\mu_0 Y_0}{\delta-g} e^{(g+\rho)t} - \frac{\beta}{\rho+\delta} \quad \text{et} \quad a_t = \frac{\bar{x}}{\alpha} e^{(\rho+\delta)t} + \frac{\mu_0 Y_0}{(\delta-g)\alpha} e^{(g+\rho)t} - \frac{\beta}{\alpha(\rho+\delta)}$$

Par ailleurs,  $\dot{A} + \delta A = a$

On pose  $z_t = A_t e^{\delta t}$  ce qui implique  $\dot{z} = \dot{A}_t e^{\delta t} + \delta A_t e^{\delta t}$  et donc  $\dot{z} e^{-\delta t} = \dot{A}_t + \delta A_t = a_t$ , d'où :

$$\dot{z}_t = \frac{\bar{x}}{\alpha} e^{(\rho+2\delta)t} + \frac{\mu_0 Y_0}{(\delta-g)\alpha} e^{(g+\rho+\delta)t} - \frac{\beta e^{\delta t}}{\alpha(\rho+\delta)}$$

Ce qu'on intègre pour obtenir :

$$z_t = \bar{z} + \frac{\bar{x}}{\alpha(\rho+2\delta)} e^{(\rho+2\delta)t} + \frac{\mu_0 Y_0}{(\delta-g)\alpha(\delta+\rho+g)} e^{(\delta+\rho+g)t} - \frac{\beta e^{\delta t}}{\alpha\delta(\rho+\delta)}$$

avec  $\bar{z}$  la constante d'intégration.

D'où :

$$A_t = z_t e^{-\delta t} = \bar{z} e^{-\delta t} + \frac{\bar{x}}{\alpha(\rho+2\delta)} e^{(\rho+\delta)t} + \frac{\mu_0 Y_0}{(\delta-g)\alpha(\delta+\rho+g)} e^{(\rho+g)t} - \frac{\beta}{\alpha\delta(\rho+\delta)}$$

Et comme  $\dot{S} = Y_0 e^{gt} (\bar{A} - A_t)$ , on obtient en intégrant :

$$S_t = \frac{Y_0}{g} (e^{gt} - 1) \bar{A} + \frac{\bar{z} Y_0}{\delta - g} (e^{(g-\delta)t} - 1) - \frac{\bar{x} Y_0}{\alpha(\rho+2\delta)(\rho+\delta+g)} (e^{(\rho+\delta+g)t} - 1) - \frac{\mu_0 Y_0^2}{(\delta-g)\alpha(\delta+\rho+g)(\rho+2g)} (e^{(\rho+2g)t} - 1) + \frac{\beta Y_0 (e^{gt} - 1)}{\alpha\delta g(\rho+\delta)} + S_0$$

$A_0$ ,  $\bar{A}$  et  $\bar{S}$  donnés, ainsi que la continuité des  $\lambda_t$  en T permettent d'identifier les 4 inconnues T,  $\bar{x}$ ,  $\bar{z}$  et  $\mu_0$ .

### 3. Modèle avec trajectoire d'émissions linéaire donnée

#### Technologie de dépollution

Programme d'un producteur décentralisé :

$$\text{Max} \int_0^\infty - \left( \frac{\alpha}{2} a_t^2 + \beta A_t \right) - \mu_t E_t dt$$

$$\text{s.c.} \quad \dot{A}_t = a_t - \delta A_t \quad \text{et} \quad Y_0 e^{gt} \bar{A} - A_t$$

Le Hamiltonien s'écrit :

$$H = - \left( \frac{\alpha}{2} a^2 + \beta A \right) - \mu_t E_t + \lambda (a_t - \delta A_t)$$

$$H = -\left(\frac{\alpha}{2}a^2 + \beta A\right) - \mu_t(Y_0 e^{gt}\bar{A} - A_t) + \lambda(a_t - \delta A_t)$$

Conditions de premier ordre :

$$\alpha a_t = \lambda_t \Leftrightarrow \lambda_t = \alpha a_t \Leftrightarrow \dot{\lambda}_t = \alpha \dot{a}_t \quad (1)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial A_t} = \dot{\lambda}_t - \rho \lambda_t = \delta \lambda_t + \beta - \mu_t \quad (2)$$

De (1) et (2) on déduit :

$$\mu_t = -\alpha \dot{a}_t + \alpha a_t(\rho + \delta) + \beta \quad (3)$$

Supposons qu'on impose une trajectoire de réduction des émissions linéaire (on ne cherche donc plus à optimiser cette trajectoire) :

$E_t = \bar{E} - \epsilon * t$  avec  $\epsilon > 0$  avec  $\bar{E}$  la quantité initiale d'émissions et  $\epsilon$  la réduction d'émissions annuelle.

Par ailleurs, on s'est placé dans un cas où l'abattement est de type « dépollution », et on a donc  $A_t = Y_0 e^{gt}\bar{A} - E_t$  et :

$$a_t = \dot{A}_t + \delta A_t = (g + \delta)Y_0 e^{gt}\bar{A} - \frac{\partial E_t}{\partial t} - \delta E_t = (g + \delta)Y_0 e^{gt}\bar{A} + \epsilon - \delta \bar{E} + \delta \epsilon t$$

Et donc  $\lambda_t = \alpha((g + \delta)Y_0 e^{gt}\bar{A} + \epsilon - \delta \bar{E} + \delta \epsilon t)$ .

Par conséquent, en utilisant (3) :

$$\mu_t = \alpha Y_0 e^{gt}\bar{A}(g + \delta)(-g + \rho + \delta) + \alpha(\rho + \delta)\delta \epsilon t - \alpha \delta \epsilon + \alpha(\rho + \delta)(\epsilon - \delta \bar{E}) + \beta$$

Le modèle TIMES (avec un puits de 95 MtCO<sub>2</sub>) fournit une trajectoire de  $\mu_t$  ce qui, à partir de 2 points de la trajectoire ( $\mu_{2030}=322\text{€/tCO}_2$  et  $\mu_{2045}=375\text{€/tCO}_2$ ), et en prenant  $g = 0$  comme dans TIMES, permet d'identifier  $\alpha$  et  $\beta$ .

## Technologie réduisant l'intensité polluante

Programme d'un producteur décentralisé :

$$\begin{aligned} & \text{Max} \int_0^{\infty} -\left(\frac{\alpha}{2}a_t^2 + \beta A_t\right) - \mu_t E_t dt \\ & \text{s. c. } \dot{A}_t = a_t - \delta A_t \text{ et } E_t = Y_0 e^{gt}(\bar{A} - A_t) \end{aligned}$$

Le Hamiltonien s'écrit :

$$H = -\left(\frac{\alpha}{2}a^2 + \beta A\right) - \mu_t E_t + \lambda(a_t - \delta A_t)$$

$$H = -\left(\frac{\alpha}{2}a^2 + \beta A\right) - \mu_t Y_0 e^{gt} (\bar{A} - A_t) + \lambda(a_t - \delta A_t)$$

Conditions de premier ordre :

$$\alpha a_t = \lambda_t \Leftrightarrow \lambda_t = \alpha a_t \Leftrightarrow \dot{\lambda}_t = \alpha \dot{a}_t \quad (1)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial A_t} = \dot{\lambda}_t - \rho \lambda_t = \delta \lambda_t + \beta - Y_0 e^{gt} \mu_t \quad (2)$$

De (1) et (2) on déduit :

$$\mu_t Y_0 e^{gt} = -\alpha \dot{a}_t + \alpha a_t (\rho + \delta) + \beta \quad (3)$$

Supposons qu'on impose une trajectoire de réduction des émissions linéaire (on ne cherche donc plus à optimiser cette trajectoire) :

$E_t = \bar{E} - \epsilon * t$  avec  $\epsilon > 0$  avec  $\bar{E}$  la quantité initiale d'émissions et  $\epsilon$  la réduction d'émissions annuelle.

Par ailleurs, on s'est placé dans un cas où l'abattement réduit l'intensité polluante, et a donc  $A_t = \bar{A} - e^{-gt} E_t / Y_0$ , et :

$$a_t = \dot{A}_t + \delta A_t = \frac{(\bar{E} - \epsilon t)(g - \delta)e^{-gt}}{Y_0} + \frac{\epsilon e^{-gt}}{Y_0} + \delta \bar{A}$$

Et donc  $\lambda_t = \alpha \left( \frac{(\bar{E} - \epsilon t)(g - \delta)e^{-gt}}{Y_0} + \frac{\epsilon e^{-gt}}{Y_0} + \delta \bar{A} \right)$ .

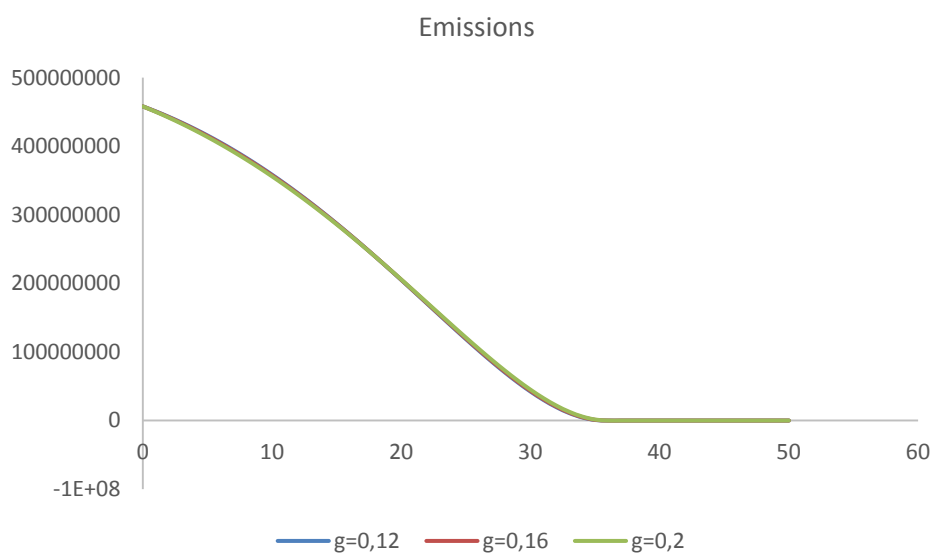
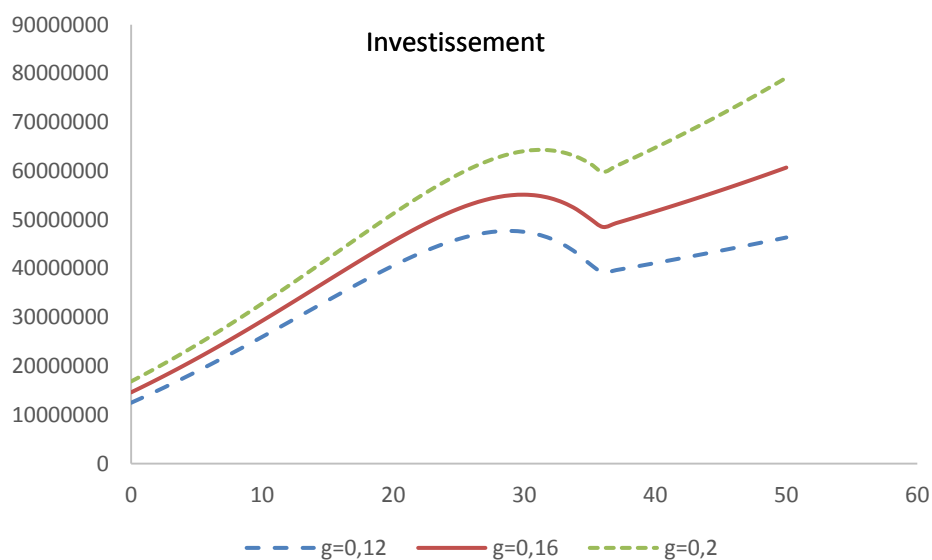
Par conséquent, en utilisant (3) :

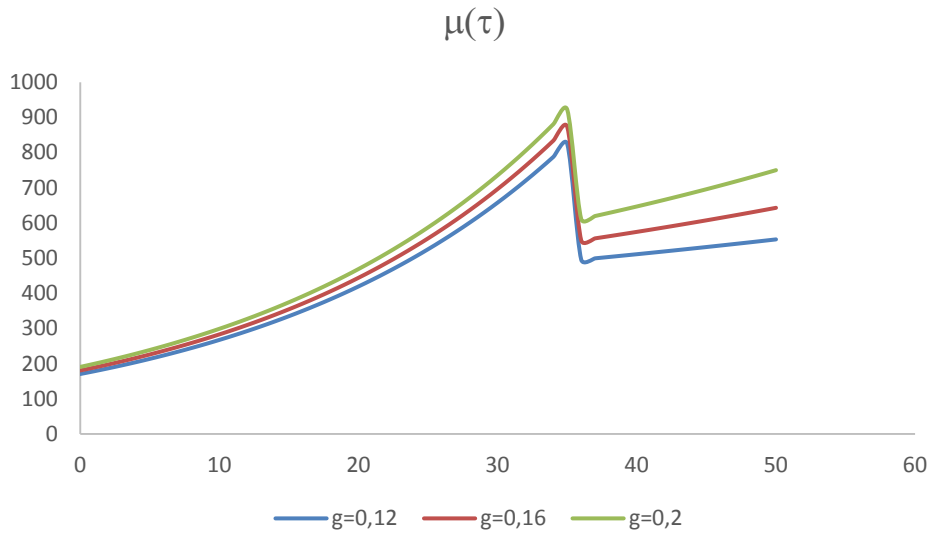
$$\mu_t = \beta + \frac{\alpha e^{-gt}}{Y_0} \cdot [(g - \delta)(g + \rho + \delta)\bar{E} + \epsilon(\rho + 2g) - (g - \delta)\epsilon t(g + \rho + \delta)] + (\rho + \delta)\delta \bar{A}$$

Le modèle TIMES (avec un puits de 95MtCO<sub>2</sub>) fournit une trajectoire de  $\mu_t$  ce qui, à partir de 2 points de la trajectoire ( $\mu_{2030}=322\text{€/tCO}_2$  et  $\mu_{2040}=375\text{€/tCO}_2$ ), et en prenant  $g = 0$  comme dans TIMES, permet d'identifier  $\alpha$  et  $\beta$ .

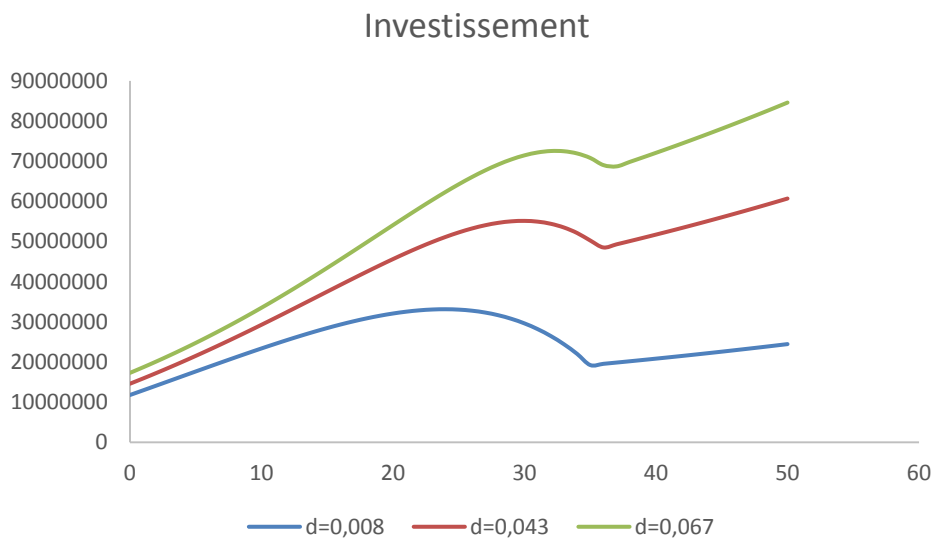
## 4. Sensibilité aux paramètres dans le cas d'une technologie de dépollution

### Sensibilité au taux de croissance



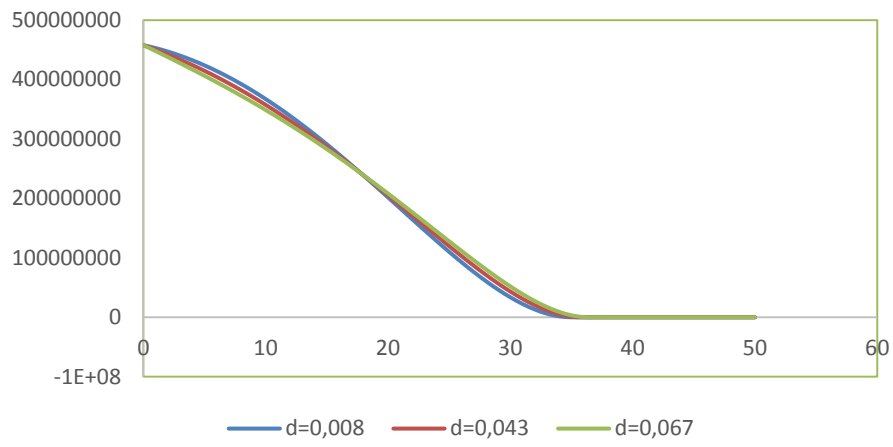


### Sensibilité au taux de dépréciation

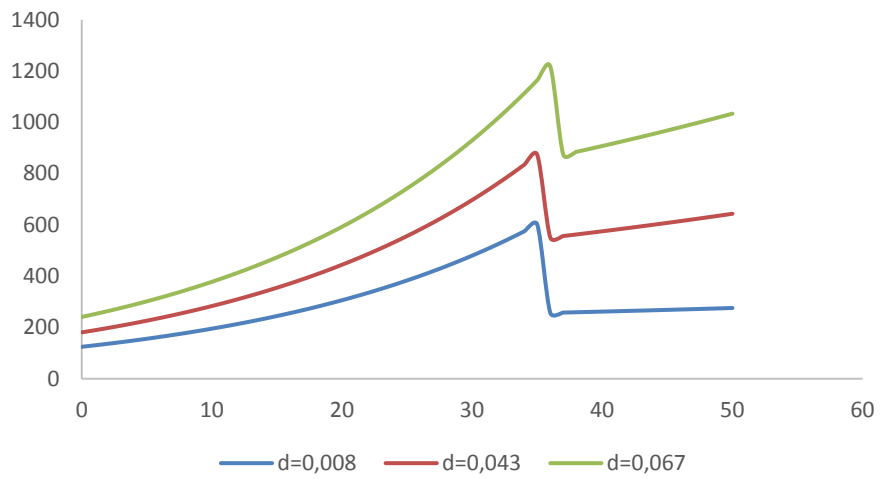




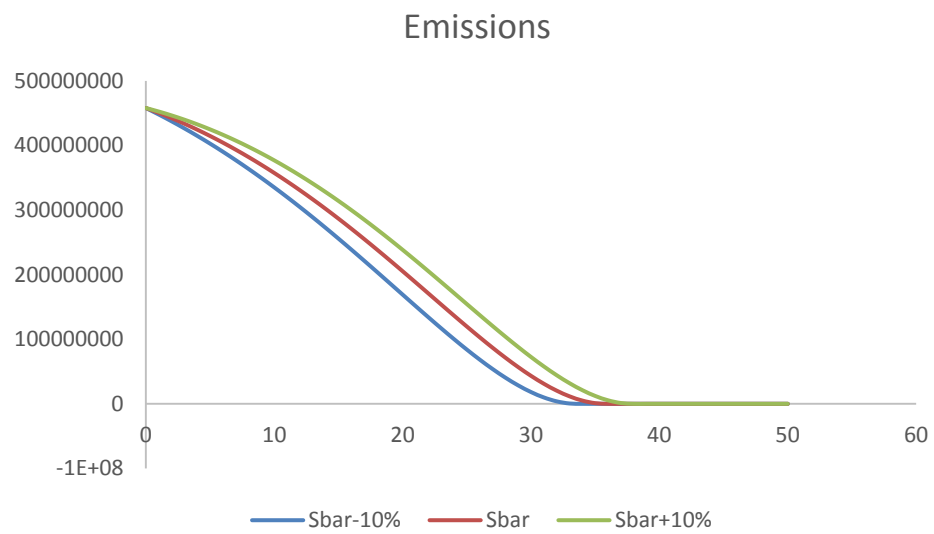
### Emissions

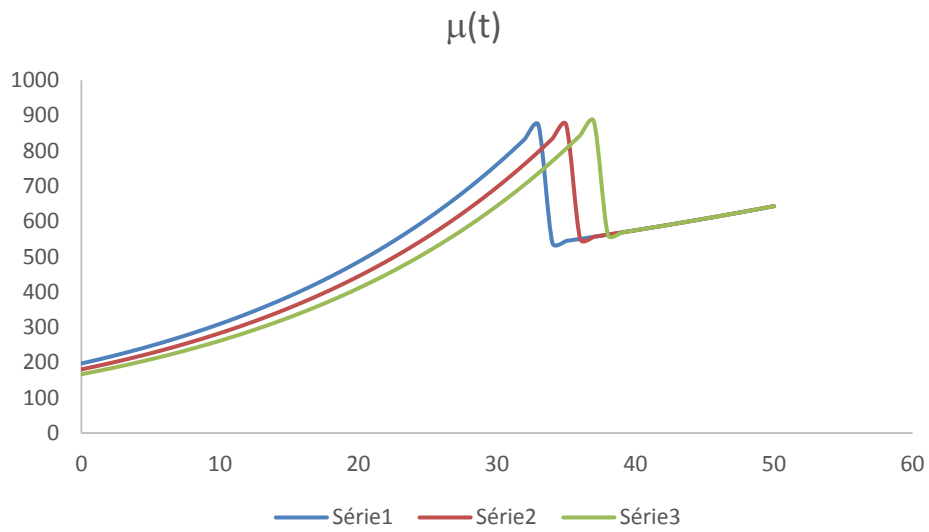


### $\mu(t)$

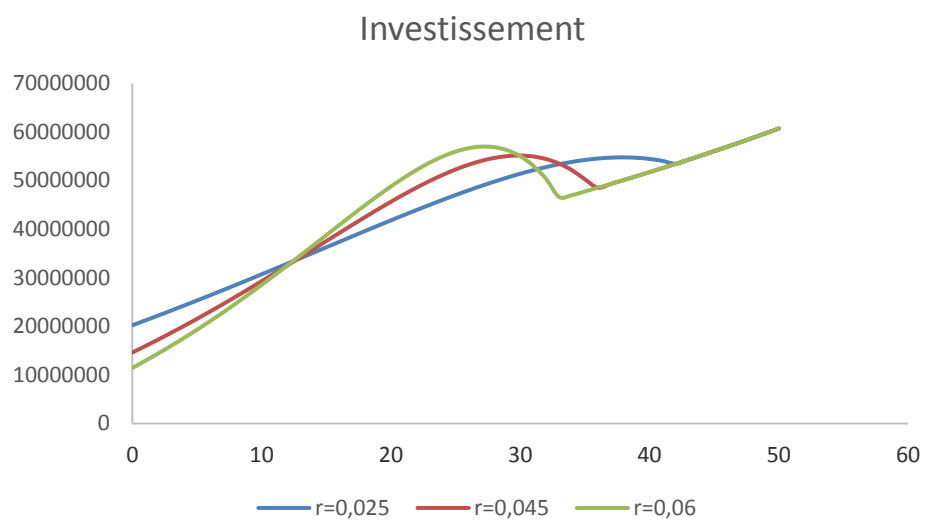


## Sensibilité au budget carbone

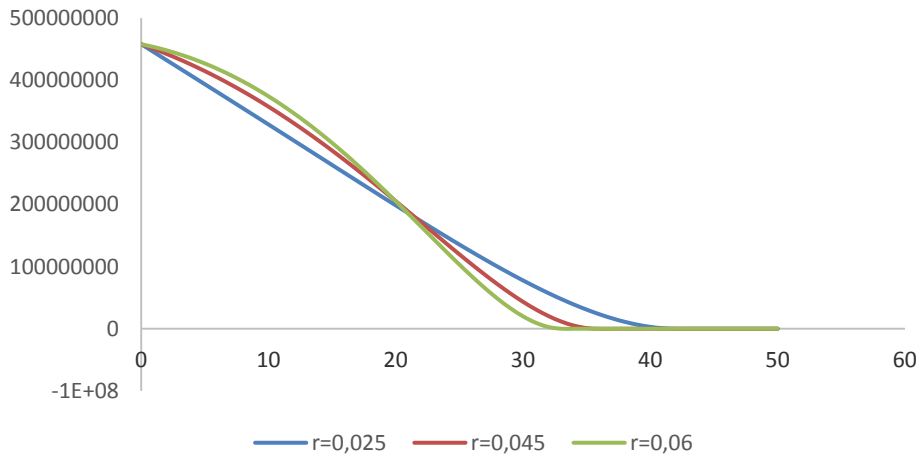




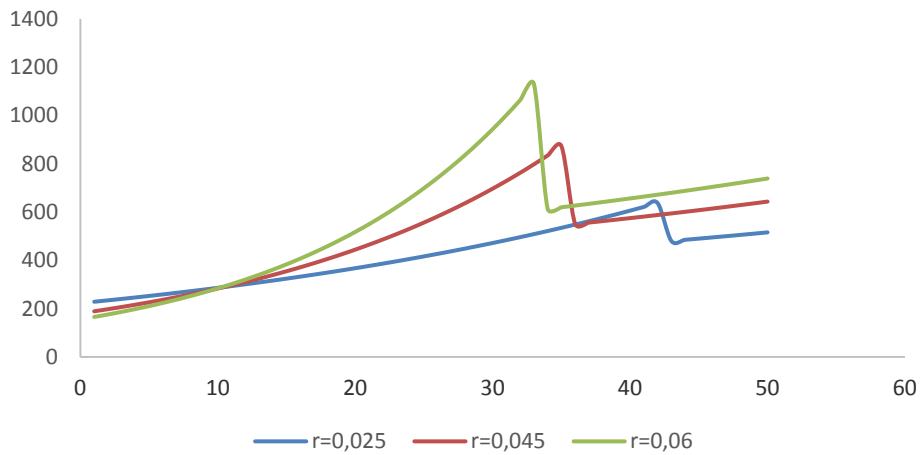
### Sensibilité au taux d'actualisation



### Emissions

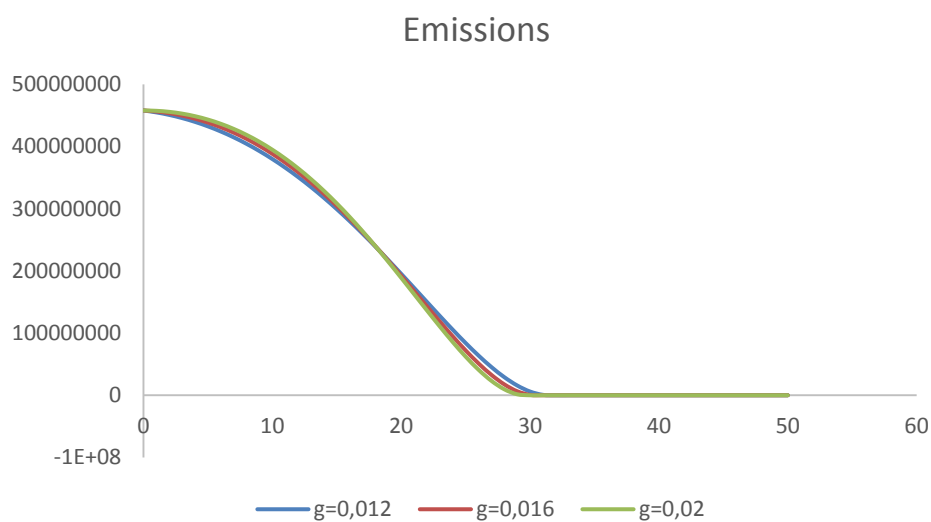
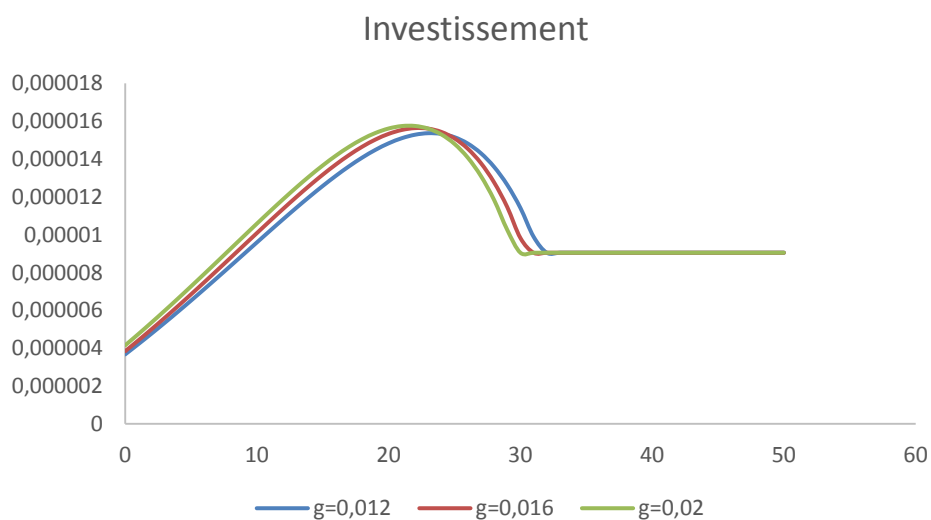


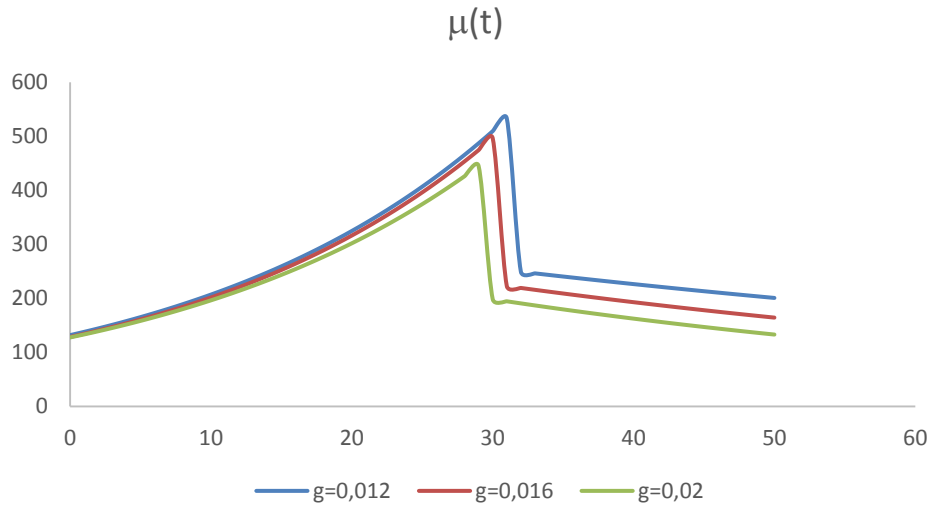
### $\mu(t)$



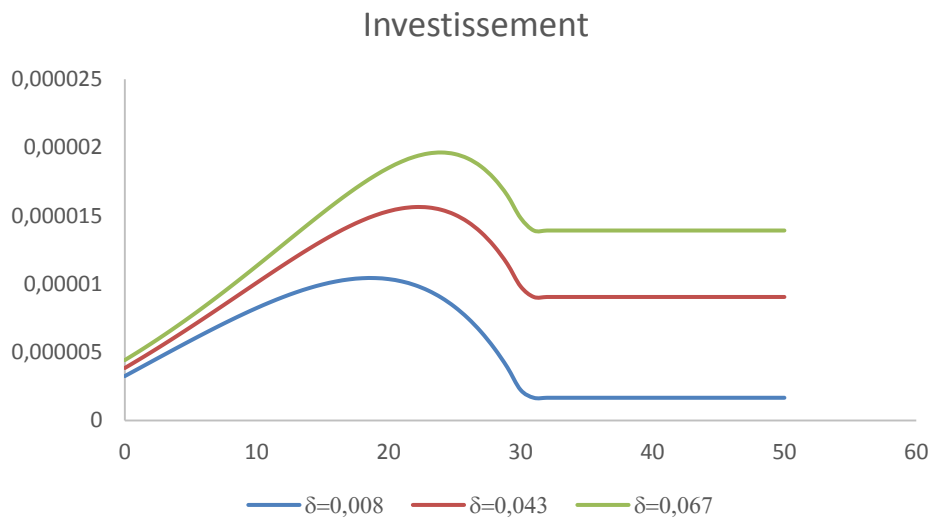
## 5. Sensibilité aux paramètres dans le cas d'une technologie de réduction de l'intensité carbone

### Sensibilité au taux de croissance

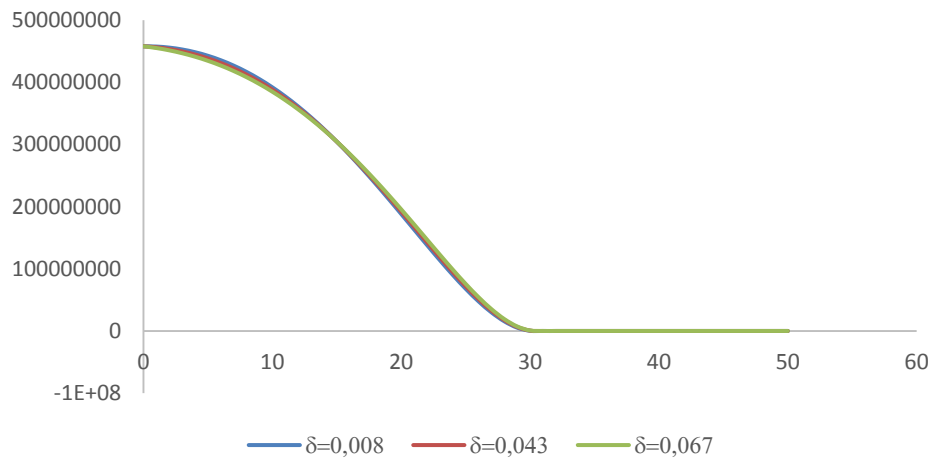




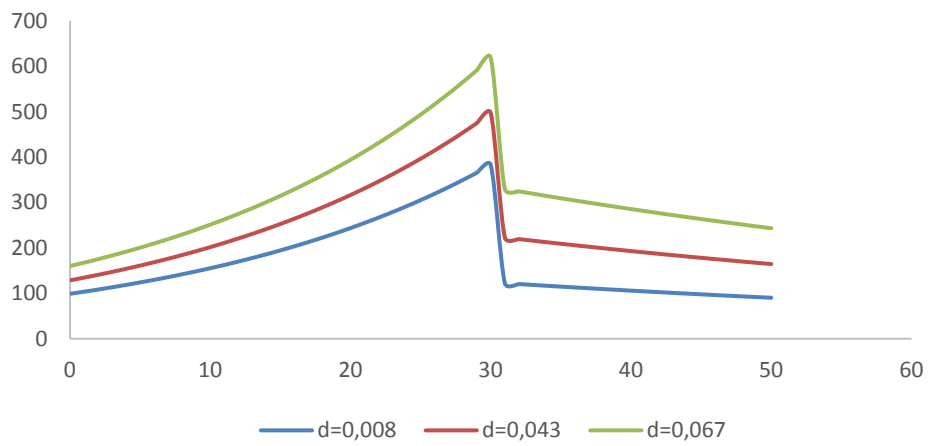
### Sensibilité au taux de dépréciation



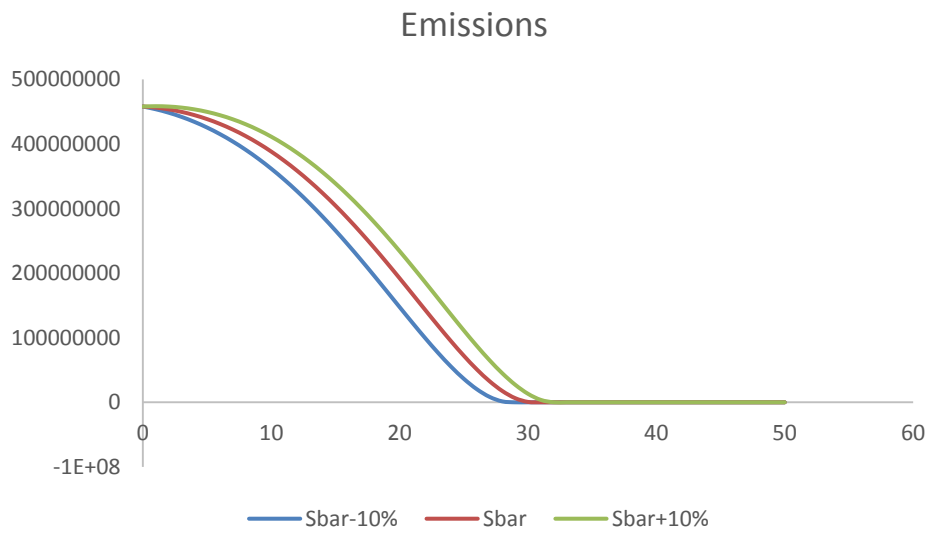
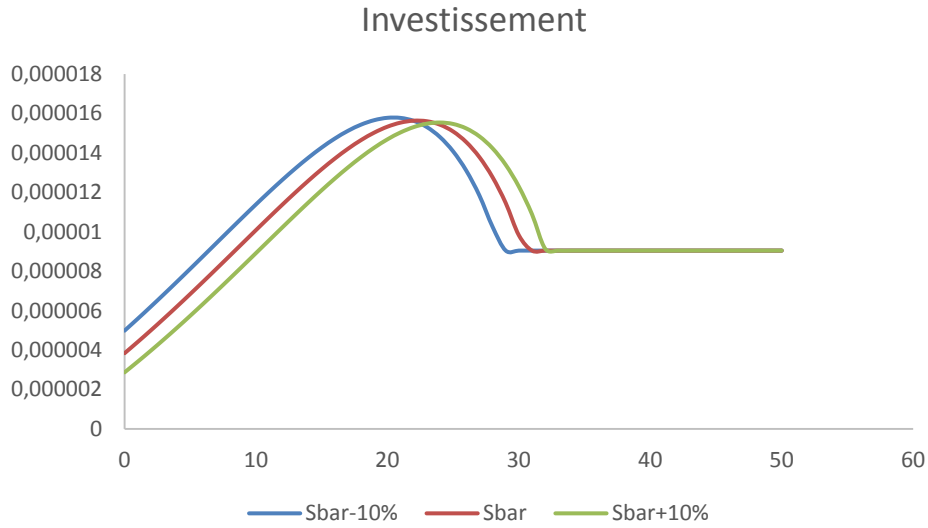
## Emissions



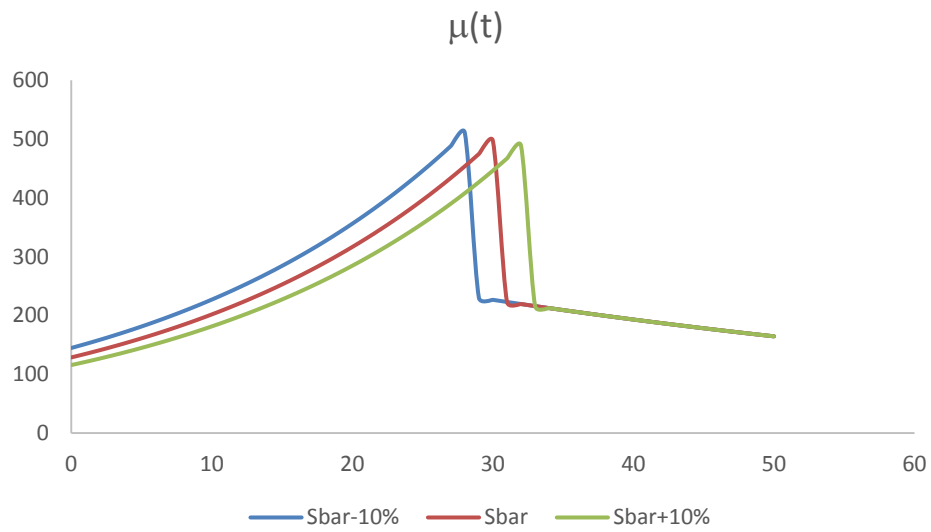
## $\mu(t)$



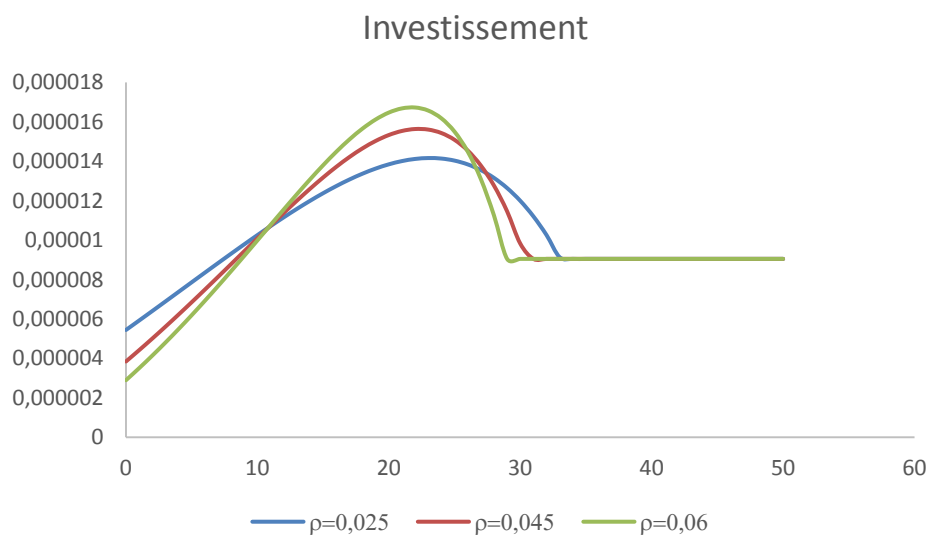
## Sensibilité au budget carbone

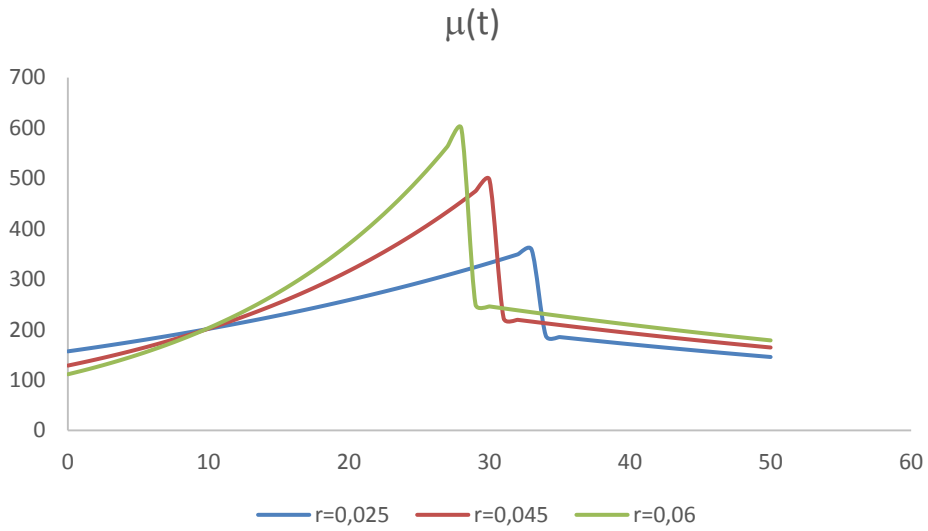
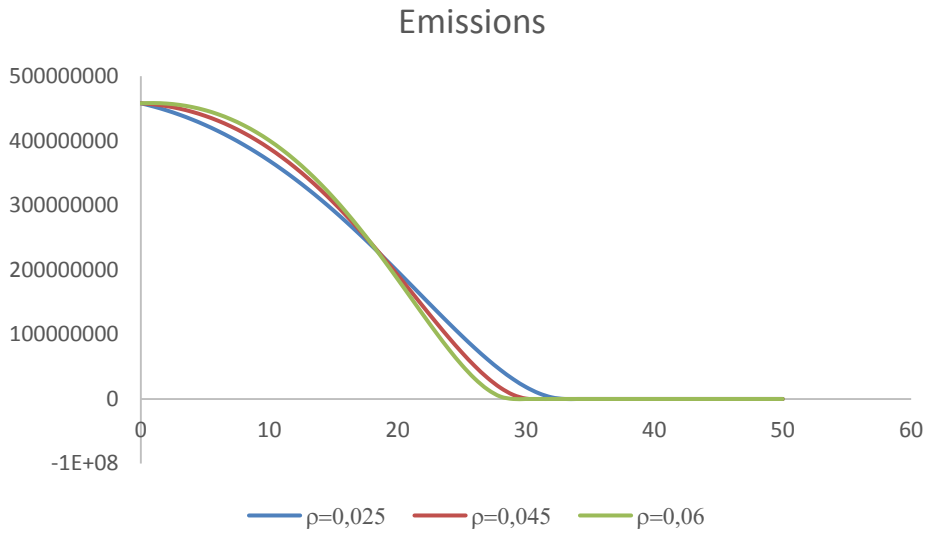






### Sensibilité au taux d'actualisation







## COMPLÉMENT 2

# PENTE DE LA VALEUR TUTÉLAIRE DU CARBONE ET RÈGLE DE HOTELLING

---

Dominique Bureau<sup>1</sup>

Les simulations réalisées par les différentes équipes de modélisation aboutissent en général à une valeur tutélaire du carbone croissant très fortement en fin de période, notamment entre 2040 et 2050, beaucoup plus vite que le taux d'actualisation retenu.

Cette configuration n'est pas totalement nouvelle. Les modélisations réalisées pour le rapport de 2009 trouvaient déjà ce type de profil. Mais cela avait moins retenu l'attention car l'horizon considéré alors pour en tirer des recommandations de politique économique se situait à plus court terme. Les objectifs de réduction fixés étaient aussi moins drastiques et le message principal demeurerait donc que, si l'action était engagée suffisamment tôt, l'objectif des 2 °C était tenable.

La question sensible alors était celle de l'acceptabilité d'un prix initial du carbone suffisamment ambitieux, avec un arbitrage, en début de période, entre prix initial et besoin ensuite de rattrapage. Les chiffres modérés de prix du carbone cités par le rapport Stern-Stiglitz s'inscrivent encore dans cette problématique, avec comme objectif de faire entrer le prix du carbone dans l'économie là où il demeure absent.

La nécessité d'aller rapidement vers des émissions nettes « zéro », compte tenu de l'épuisement accéléré de notre « budget carbone », justifie-t-elle un taux de croissance à long terme de la valeur marginale des coûts d'abattement qui serait supérieur à celui de la règle de Hotelling ? En théorie, la réponse est négative car celle-ci exprime fondamentalement que l'atténuation du risque climatique est un problème de stock, face

---

<sup>1</sup> Délégué général du Conseil économique pour le développement durable, conseiller scientifique à France Stratégie.

à un risque catastrophique : le déterminant du changement climatique et de ses impacts étant la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la question est d'assurer que le stock accumulé ne dépasse pas un seuil rédhibitoire.

Le problème étant ainsi exprimé, la règle de Hotelling suit : les efforts de réduction doivent être engagés par ordre de mérite, leur coût marginal croissant au rythme de l'actualisation comme pour une ressource épuisable. En effet, à la marge de la trajectoire optimale, on doit être indifférent à déplacer le profil des efforts entre deux instants, à stock final de GES inchangé. Mais, pour que le coût d'abattement total soit aussi inchangé, il faut donc que le coût marginal actualisé des efforts soit identique à chaque période. En conséquence, le renforcement de la contrainte sur le budget carbone ne devrait pas se traduire par un relèvement de la pente du prix du carbone mais par celui de son niveau initial.

De même, une réévaluation des potentiels des différentes technologies envisageables à long terme pourrait conduire à revoir à la baisse certains coûts des « backstops » (sous réserve que les cadres pour l'innovation et le déploiement industriel soient en place). Mais, à nouveau, l'impact serait sur le prix initial – ici à la baisse –, non sur la pente, qui est essentiellement déterminée par la structure des dommages.

Certes, le problème a été posé ci-dessus de manière excessivement schématique. Il faut prendre en compte les courbes d'apprentissage, la progressivité des dommages qui interviennent dès maintenant, introduire le risque et le souci de se ménager des options si les émissions négatives ne sont pas au rendez-vous, éviter de stimuler l'accélération de l'usage des fossiles avant que la fenêtre ne se referme, etc. Mais ceci n'amène qu'à corriger la règle de Hotelling, dont la logique demeure. De plus les corrections citées vont toutes dans le sens d'une réduction de la pente et d'un accroissement du prix initial.

Faut-il alors incriminer la manière dont les travaux de modélisation ont été spécifiés ? Il semble en effet que l'explosion de la VTC à long terme est associée à la contrainte qui a été fixée sur les émissions en fin de période. Cependant, celle-ci semble réaliste comme point de passage d'un scénario 2 °C (étant noté évidemment que celui-ci ne prend son sens que si la coopération internationale est renforcée « I will, if you will »).

De plus, s'il est exact que, si l'optimisation était réalisée en horizon infini, la contrainte sur le budget carbone serait suffisante, en revanche, ce n'est pas suffisant quand on optimise sur la sous-période allant d'aujourd'hui à 2050 : si l'on admet que l'essentiel des réductions à long terme ont pour conditions le déploiement de nouveaux équipements et infrastructures, l'optimisation à cet horizon doit prendre en compte comme contraintes, outre la part du budget carbone que l'on peut allouer à cette période, le stock de capital spécifique devant être disponible en 2050 (cf. Annexe).

En d'autres termes, il faut intégrer la valeur économique résiduelle de ces équipements, égale au coût d'avoir à les mettre en place sinon « instantanément » en 2050. En effet, si on ne considère que la contrainte sur le budget carbone, seuls les équipements pouvant être amortis d'ici 2050 seront mis en place, imposant alors un effort renforcé de réduction en début de période pour compenser.

On peut sans doute admettre par ailleurs : que ce type d'effort ne nécessitant pas d'investissements nouveaux sera saturé à cet horizon, la fixation du niveau d'émissions en 2050 est alors un bon proxy de la contrainte complémentaire à considérer ; et qu'en se fixant la durée pour l'atteindre, on s'est donné implicitement un budget carbone. Dans ses conditions, le problème d'optimisation à l'horizon 2050 semble correctement spécifié dans ses principes.

Certes, il faudrait sans doute vérifier plus avant la cohérence des chiffres (en s'assurant que les VTC finales apparentes « excessives » traduisent que les investissements correspondants ne devraient pas encore être amortis en 2050 et que ceci n'a été rendu possible qu'en mettant des prix artificiellement élevés du carbone à cet horizon). Plus généralement, le sens de ces pentes finales est sans doute à relativiser par rapport à l'exposé des conséquences qualitatives à en tirer, en matière de politique d'innovation et de coopération internationale.

### Annexe : modèle simple de décarbonation

On considère deux sources d'abattements à chaque instant  $t$ :

-les premiers ( $A_t$ ) nécessitant l'installation préalable d'un capital spécifique ( $K_t = f(A_t)$  avec  $f' > 0$  et  $f'' > 0$ ),

-les seconds ( $B_t$ ) nécessitant un coût  $C(B_t)$  (avec  $C' > 0$  et  $C'' > 0$ )

Soient  $E_t$  les émissions tendancielles à chaque instant,  $S$  le stock de GES dans l'atmosphère admissible et  $\rho$  le taux d'actualisation. Si on suppose que le capital « vert » peut être installé instantanément et ne se déprécie pas, le programme d'optimisation intertemporelle à résoudre est de minimiser les coûts d'abattements actualisés sous la contrainte du budget carbone à respecter. La trajectoire de développement des capacités d'abattements « profonds » est un résultat de ce programme, qui s'écrit :

$$\begin{aligned} \min K_0 + \int_0^{\infty} (C(B_t) + \dot{K}_t) e^{-\rho t} dt & \quad t \\ \text{sc } \int_0^{\infty} (E_t - B_t - A_t) dt \leq S & \end{aligned}$$

La trajectoire optimale correspondante de mobilisation et répartition des deux types d'efforts apparaît alors définie par le fait, qu'à tout instant où les émissions seront positives, on aura :

$$(1) \quad P e^{\rho t} = C'(B_t) = \rho f'(A_t)$$

avec  $P$  ajusté pour tenir la contrainte sur le budget carbone. Cette variable correspond à la valeur initiale pour la valeur tutélaire du carbone (VTC) et l'équation (1) est simplement la règle de Hotelling, qui s'applique à tous les types d'abattements (croissance de la VTC au taux d'actualisation).

Par ailleurs, sous les hypothèses faites, l'installation du capital « vert » suit la règle habituelle de rentabilité immédiate des projets : les bénéfices apportés par une capacité supplémentaire étant croissants et en l'absence de dépréciation, on compare simplement la valeur des réductions supplémentaires qu'ils permettent au coût d'anticipation du capital nécessaire pour les obtenir. Cependant, introduire des coûts d'ajustement, de la dépréciation ou de l'obsolescence technique modifierait le profil des efforts et la valeur initiale de la VTC mais non la pente de la VTC, qui reflète la structure des dommages (ie externalité de « stock »).

Si l'on ne considère qu'une sous-période  $[0, T]$ , il faut, pour retrouver cette trajectoire optimale, se donner les deux contraintes de stock : celle sur le budget carbone optimal à allouer à cette sous période ; et aussi une sur le stock de capital vert à mettre en place en fin de période. Sans cette dernière, l'accumulation du capital vert s'arrêterait en effet prématurément lorsqu'il apparaît que le capital supplémentaire ne pourrait être amorti à l'horizon de  $T$  : pour corriger cela, il faut compter la valeur résiduelle à cette date, égale au coût d'installation d'un montant équivalent de capital en fin de période, pour disposer ultérieurement de cette capacité d'abattement.

Mais on ne peut évidemment ignorer celle le budget carbone car, sinon, la mise en place des efforts serait retardée, seule la contrainte de flux en fin de période étant respectée. Sachant que le budget carbone au-delà de 2050 est évanescent, ceci signifierait in fine le dépassement du budget global.



## COMPLÉMENT 3

# ON THE EFFICIENT GROWTH RATE OF CARBON PRICE UNDER A CARBON BUDGET<sup>1</sup>

---

Christian Gollier<sup>2</sup>

When an intertemporal carbon budget is imposed to fight climate change, abating emissions earlier has a social rate of return that is equal to the growth rate of the marginal abatement cost, i.e., of the carbon price. I use a normative version of asset pricing theory to determine the efficient level of the growth rate of expected carbon price in this Hotelling's framework under uncertainty. When future marginal abatement costs are negatively correlated with aggregate consumption, an immediate vigorous reduction in emissions provides a hedge against the macroeconomic risk borne by the representative agent. The growth rate of expected carbon price should therefore be smaller than the interest rate in that case, and the initial carbon price should be large. The opposite is true when this correlation is positive, and the Hotelling's rule applies as a limit case with independence. We calibrate a simple two-period version of the model by introducing infrequent macroeconomic catastrophes à la Barro in order to fit the model to observed assets pricing in the economy. From this numerical exercise, we recommend a growth rate of expected carbon price around 3.5% per year (plus inflation), which is much larger than the 1% equilibrium interest rate in our economy.

---

<sup>1</sup> The author wants to thank Ottmar Edenhofer, Simon Quemin, Alain Quinet, Kai Lessmann, Chuck Mason and Cees Withagen for particularly helpful comments, together with seminar participants at PIK (Potsdam) and at the 5th annual Conference of FAERE. The research leading to this paper has received indirect funding from Engie, EDF, Total, SCOR through TSE research contracts, and from the Chair "Sustainable Finance and Responsible Investments" at TSE.

<sup>2</sup> Toulouse School of Economics, University of Toulouse-Capitole.

**Keywords:** Uncertain mitigation cost, marginal abatement cost, Hotelling's rule, consumption-based CAPM. 0.5cm *JEL codes:* Q54, D81, G12.

## Introduction

Global warming is a global externality that should be managed by imposing a uniform carbon price equaling the discounted marginal climate damage of carbon dioxide.<sup>3</sup> Because ecological and economic systems are expected to be more stressed in the future, the estimate of this social cost of carbon is expected to grow over time.<sup>4</sup> For example, using a 3% discount rate, the U.S. administration published a scientific report (Interagency Working Group on the Social Cost of Greenhouse Gases (2013, Revised August 2016)) based on this cost-benefit approach that recommends a price of 42 dollars per ton of CO<sub>2</sub> in 2020, growing to 69 dollars in 2050. This yields a growth rate of 0.7% per year.

Given the overwhelming difficulty to estimate the flow of marginal damages generated by greenhouse gases, this cost-benefit approach to carbon pricing tends to be replaced by a cost-efficiency approach in which a concentration target is exogenously determined.<sup>5</sup> Given the current state of the atmosphere, this concentration target can be translated into an exogenous intertemporal carbon budget. Determining the optimal timing to consume this carbon budget is a problem equivalent to the Hotelling's problem of extracting a non-renewable resource (Hotelling (1931)). This implies that, under certainty, the price of carbon should grow at the interest rate. The intuition of this result is simple: If future marginal abatement costs are perfectly known today, reallocating the carbon budget intertemporally is a safe. In particular, a marginal increase in the abatement effort today that is compensated by an equivalent reduction of the abatement in the future<sup>6</sup> is a safe investment project that we hereafter call "abatement frontloading". It costs the marginal abatement cost today and that generates a future benefit equaling the future marginal abatement cost. Thus, it yield a return that is equal to the growth rate of the marginal abatement cost, i.e., of the carbon price. The evaluation and implementation decision of this safe investment project should be treated as for any other safe projects in the economy. In particular, its equilibrium return, which is the growth rate of carbon price, should be equal to the interest rate. And the discount rate that should be used to

---

<sup>3</sup> See for example Gollier and Tirole (2015) for a recent policy paper on this issue.

<sup>4</sup> Van der Ploeg and Withagen (2014) provide an analysis of the determinants of the growth rate of the social cost of carbon in a Ramsey growth model with an exhaustible fossil resource, an infinitely elastic supply of renewables and a convex climate damage function under certainty.

<sup>5</sup> For a discussion about the uncertainty surrounding the climate damage function, see for example Pindyck (2013). The use of a carbon budget has also been promoted by incentive schemes based on emissions targets, such as the Kyoto Protocole and the various markets for carbon permits that exist now around the world.

<sup>6</sup> In this introduction, we assume for simplicity that there is no natural decay of carbon dioxide in the atmosphere.



evaluate the social benefit of the intertemporal reallocation of the carbon budget should also be the interest rate. These are the two faces of the same coin, since entrepreneurs and investors active on the market for emission permits will use the interest rate as the discount rate to evaluate the abatement frontloading strategy if they are confronted to a cost of capital equaling the interest rate. Private and public interests will be aligned.<sup>7</sup>

But in the long term, the evolution of abatement costs is fundamentally uncertain, together with the evolution of the carbon budget and with the emissions in the business-as-usual scenario. Nobody really knows today what will be the cost of abatement associated to wind or solar energy in 30 years. And deep uncertainties surround future electricity storage technologies and nuclear fusion for example. The extraordinary large uncertainty surrounding the emergence of economically viable renewable systems of energy is an inherent dimension of the energy transition. One should also recognize that scientific discoveries in the future could induce us to revise the carbon budget downwards or upwards. This implies that modelers around the world face enormous challenges to implement this cost-efficiency approach to carbon pricing. In this paper, we focus the analysis on how uncertainty affects the efficient rate of growth of the carbon price. Proponents of the precautionary principle claim that this uncertainty should induce us to implement strong immediate actions to reduce emissions. This suggests that uncertainty should push carbon prices up in the short run, thereby allowing for a reduction of the growth rate of carbon price to satisfy the carbon budget.<sup>8</sup>

Because abatement frontloading is risky when the evolution of abatement cost is uncertain, asset pricing theory tells us that its expected return should not necessarily be equal to the interest rate at equilibrium. A positive or negative risk premium should be included to the growth rate of carbon price in order to take account of the impact of the climate policy on the macroeconomic risk. Suppose for example that marginal abatement costs are negatively correlated with aggregate consumption. In that context, the future benefit of abating early is also negatively linked to economic growth, and performing this investment reduces the macroeconomic risk. Fighting climate change early has the extra benefit to hedge the macro risk in that case. This climate policy should be promoted by imposing a large initial carbon price, and a low growth rate of this expected price. The main message of this paper is that the growth rate of expected carbon price should be smaller (larger) than the interest rate whenever the marginal abatement cost is negatively (positively) correlated to aggregate consumption. This policy provides the right price signal for private investors in renewables technologies to take account of the impact of

---

<sup>7</sup> Chakravorty et al. (2006) and Chakravorty et al. (2008) reexamined the Hotelling's problem of optimal extraction of nonrenewable resources with a carbon budget under certainty when different resources differ in their extraction costs and pollution intensities.

<sup>8</sup> Another reason for doing more efforts earlier is that governments face a credibility issue about their long-term commitments. Laffont, J. and J. Tirole (1996) take this question seriously by proposing a commitment device based on forward financial contracts.

their decisions on social welfare, as is the case on efficient financial markets for other investment projects.

Our approach to this problem is based on the Consumption-based Capital Asset Pricing Model (CCAPM) of Breeden (1979), Lucas (1978) and Rubinstein (1976) to assure the coherence between carbon pricing and the pricing of other assets in the economy. We solve the classical asset pricing puzzles (Mehra and Prescott (1985), Weil (1989) and Kocherlakota (1996)) by introducing catastrophes in the growth process, as suggested by Barro (2006). In this framework, we show that the beta of abatement frontloading is the income-elasticity of marginal abatement costs. Multiplying this beta by the equilibrium aggregate risk premium tells us by how much the growth rate of expected carbon price should differ from the equilibrium interest rate.

It remains thus to characterize the determinants of this "carbon beta".<sup>9</sup> We show in the second part of this paper that the sign of this carbon beta is generally ambiguous. But three elements matter to determine this sign. Suppose first that the evolution of green technologies is the main source of long-term uncertainty in the economy. In that case, assuming a positive link between total and marginal abatement costs, the occurrence of an optimistic scenario with strong green innovations will imply at the same time a low marginal abatement cost and a large aggregate consumption (because of the low cost of fighting climate change). Thus, when the main source of uncertainty is technological, a negative carbon beta prevails, yielding an efficient growth rate of expected carbon price below the interest rate.

Consider a second context in which the main source of uncertainty is about economic growth. Assuming a convex abatement function, the occurrence of a large growth scenario implies more emissions under business-as-usual. This implies more abatement efforts and thus a larger marginal abatement cost. In this second context, one should expect a positive correlation between marginal abatement cost and aggregate consumption. This positive correlation is in line for example with the crash of the price of emission permits observed on the EU-ETS market during the subprime and eurozone crises during the last decade. The traditional explanation is based on the glut of carbon credits due to the low emission intensity during these crises.<sup>10</sup> Under such a positive correlation, one should impose a growth rate of expected carbon price larger than the interest rate (and a low initial carbon price). In the third context, suppose that the carbon budget is the main source of uncertainty. If it happens that the carbon budget is larger than expected, the marginal abatement cost will be low (because of the convexity of the

---

<sup>9</sup> Dietz et al. (2018) estimated another concept of a climate beta that based on a cost-benefit analysis as in the DICE model. The approach used in this paper is alternatively based on a cost-efficiency analysis in which the carbon budget is exogenously fixed.

<sup>10</sup> Although the estimated correlation between carbon prices on the EU-ETS market and quarterly growth rate of GDP in the EU28 is positive, it is not statistically significant.

abatement function) and consumption will be large (because of the low total abatement cost). This negative carbon beta implies that one should impose a growth rate of expected carbon price smaller than the interest rate in that case.

## 1. The efficient growth rate of expected carbon price

In this section, we examine a simple dynamic model of exogenous growth and technological uncertainty. Consider an economy with a fixed carbon budget. Suppose that this carbon budget has been allocated intertemporally in an optimal way. We determine the properties of the schedule of carbon prices that supports this optimum. In the spirit of the CCAPM, suppose that the economy has a representative agent whose rate of pure preference for the present is  $\rho$ . The von Neumann-Morgenstern utility function  $u$  of the representative agent is increasing and concave. Along the optimal path, the consumption per capita  $C_t|_{t \geq 0}$  evolves in a stochastic way.

In the constellation of investment opportunities existing in the economy, consider a marginal project that yields a cost  $I_0$  today and generates a single benefit  $B_t$  at date  $t$ , where  $B_t$  is potentially uncertain and statistically related to stochastic process governing aggregate consumption. At the margin, investing in this project raises the discounted expected utility of the representative agent by

$$\Delta V = -I_0 u'(C_0) + e^{-\rho t} E[B_t u'(C_t)] = u'(C_0) \times NPV, \quad (1)$$

with

$$NPV = -I_0 + e^{-r_t t} E[B_t] \quad (2)$$

and

$$e^{-r_t t} = e^{-\rho t} \frac{E[B_t u'(C_t)]}{u'(C_0) E[B_t]}. \quad (3)$$

This means that the increase in the representative agent's intertemporal welfare generated by the project is proportional to its Net Present Value (NPV) when using the appropriate risk-adjusted discount rate  $r_t$  to discount the project's expected future benefit. This supports the use of the NPV rule to evaluate the investment project. The efficient discount rate defined by equation (3) depends upon the risk profile of the project and its maturity. Notice also that along the optimal path, all socially desirable investments must have been implemented so that  $NPV = 0$  is an equilibrium condition, yielding the property that  $\exp(r_t t)$  be equal to  $EB_t / I_0$ , which is the expected gross rate of return of

the project. In other words, the socially desirable discount rate of an asset must also be its expected rate of return at equilibrium. Because entrepreneurs implementing the project must compensate stakeholders by offering this return in expectation, this induces them to invest in it only if its expected return is larger than  $r_t$ . This is equivalent to using  $r_t$  as the discount rate to evaluate the project. This is an illustration of the first theorem of welfare economics.

We apply this classical justification of the efficient risk-adjusted discount rates and of equilibrium expected returns to three specific assets. Consider first the case in which the future benefit is certain, or more generally when it is independent of  $C_t$ . This yields the risk-free discount rate  $r_{ft}$ , i.e., the interest rate, which is defined as follows:

$$\exp(-r_{ft}t) = \exp(-\rho t) \frac{E[u'(C_t)]}{u'(C_0)}. \quad (4)$$

Similarly, the risk-adjusted discount rate  $r_{ct}$  to discount a claim on aggregate consumption must satisfy the following efficiency condition:

$$\exp(-r_{ct}t) = \exp(-\rho t) \frac{E[C_t u'(C_t)]}{u'(C_0) E[C_t]}. \quad (5)$$

The systematic risk premium  $\pi_t$  is the extra expected rate of return of a claim on aggregate consumption over the interest rate that must compensate agents who accept to bear the macroeconomic risk:

$$\pi_t = r_{ct} - r_{ft}. \quad (6)$$

It is easy to check that  $\pi_t$  is positive at equilibrium under risk aversion.

Finally, consider an investment consisting in abatement frontloading: One increases the abatement effort today by one ton of carbon dioxide. This allows for abating  $\exp(-\delta t)$  less tons of carbon dioxide in  $t$  years, where  $\delta$  is the rate of decay of carbon dioxide. This implies that the concentration of CO<sub>2</sub> is unaffected by this intertemporal reallocation at any time after date  $t$ . Because the initially optimal allocation satisfies the carbon budget constraint, this new allocation does also satisfy this constraint. Let  $A'_t|_{t \geq 0}$  denote the dynamics of marginal abatement costs along the optimal allocation of climate efforts. This investment yields an initial cost  $I_0 = A'_0$  and generates a future benefit  $B_t = \exp(-\delta t) A'_t$ . Therefore, it is socially desirable that this benefit be discounted at rate  $g$  satisfying the following condition:

$$\exp(-g_t t) = \exp(-(\delta + \rho)t) \frac{E[A'_t u'(C_t)]}{w(C_0)E[A'_t]} \quad (7)$$

If the climate policy is decentralized through a market for emission permits, marginal abatement costs will be equalized across firms and individuals, and will be equal to the equilibrium carbon price  $p_t$ . Remember now that  $g_t$  can also be interpreted as the equilibrium expected return:  $\exp(g_t t)$  must be equal to  $EA'_t / A'_0$ , i.e., to  $Ep_t / p_0$ . This means that  $g_t$  is the efficient growth rate of expected carbon price.

Combining equations (4), (7) and  $\exp(g_t t) = Ep_t / p_0$  yields

$$\frac{Ep_t}{p_0} = \exp((r_{ft} + \delta)t) \frac{E[A'_t]E[u'(C_t)]}{E[A'_t u'(C_t)]},$$

or, equivalently,

$$\frac{1}{t} \log \left( \frac{Ep_t}{p_0} \right) = r_{ft} + \delta + \frac{1}{t} \log \left( \frac{E[A'_t]E[u'(C_t)]}{E[A'_t u'(C_t)]} \right). \quad (8)$$

The left-hand side of this equality is the annualized growth rate of expected carbon price between dates 0 and  $t$ . Suppose first that  $A'_t$  is constant, or more generally, statistically independent of  $C_t$ . In that case, the last term in the right side of this equality vanishes. This implies that the efficient growth rate of (expected) carbon price must be equal to the sum of the interest rate and the rate of natural decay of carbon dioxide in the atmosphere. This is the well-known Hotelling's rule adapted to carbon pricing under a fixed intertemporal carbon budget (Schubert (2008)).

More generally, equation (8) tells us that  $g_t$  is larger or smaller than  $r_{ft} + \delta$  depending upon whether the last term in the right-hand side of this equality is positive or negative. At this stage, let us characterize the uncertainty by a set of possible states of nature and an associated probability distribution on these states. A random variable is a function of the state of nature. Two random variables  $(X, Y)$  are said to be comonotone if for any pair  $(s, s')$  of states of nature,  $(X(s) - X(s'))(Y(s) - Y(s'))$  is non-negative. Comonotonicity is a strong form of positive correlation. Anti-comonotonicity is defined symmetrically. Suppose now that  $A'_t$  and  $C_t$  are comonotone. Because  $u'$  is decreasing, this implies that  $A'_t$  and  $u'(C_t)$  are anti-comonotone. By the covariance rule (Gollier (2001), Proposition 15), this implies that  $E[A'_t u'(C_t)]$  is smaller than  $E[A'_t]E[u'(C_t)]$ . This implies that the last term of the right-hand side of the above equation is positive. This means in turn that the growth

rate of expected carbon price is larger than  $r_{ft} + \delta$ . This demonstrates the following result.

*Proposition 1. The growth rate of the expected carbon price that supports the optimal temporal allocation of abatement efforts is larger (smaller) than the sum of the interest rate and the rate of decay of carbon dioxide if the marginal abatement cost and aggregate consumption are (anti-) comonotone.*

From the social point of view, facing a positive correlation between marginal abatement costs and aggregate consumption is good news. It means that the worst-case scenarios in terms of abatement costs arise when aggregate consumption is large, i.e., when the marginal abatement effort has a smaller utility impact. This means abating more in the future reduces the macroeconomic risk. It raises the collective willingness to postpone abatement efforts. In a decentralized economy, this is translated into increasing the incentive to do so by selecting a growth rate of expected carbon price larger than the sum of the interest rate and the rate of natural decay. From the individual point of view, as long as some abatement efforts are implemented today, investors who implement the abatement frontloading must be compensated for the fact that the benefit of doing so (compared to late renewable adopters) has a positive beta, in the sense that the return of this investment is smaller when other assets also perform poorly in the economy. Because the return of abatement frontloading is the growth rate of carbon price, this compensation takes the form of a growth rate of expected carbon price larger than the sum of the interest rate and the rate of natural decay.

Let us now consider the following special case. Suppose that relative risk aversion is a constant  $\gamma$ . Suppose also that aggregate consumption and marginal abatement costs evolve according to the following stochastic process:

$$dc_t = \mu_c dt + \sigma_c dz_t \quad (9)$$

$$da'_t = \mu_p dt + \phi \sigma_c dz_t + \sigma_w dw_t, \quad (10)$$

with  $c_t = \log C_t$  and  $a'_t = \log A'_t$ , and where  $z_t$  and  $w_t$  are two independent standard Wiener processes.<sup>11</sup> This means that the logarithm of aggregate consumption and marginal costs are jointly normally distributed. Parameters  $\mu_c$  and  $\sigma_c$  are respectively the trend and the volatility of consumption growth. The trend of growth of the marginal abatement cost, and thus of the carbon price, is given by parameter  $\mu_p$ . The volatility of

<sup>11</sup> Without loss of generality, I normalize  $C_0$  and  $A'_0$  to unity.

the marginal abatement cost has an independent component  $\sigma_w$  and a component coming from its correlation with economic growth. Notice that  $\phi$  can be interpreted as the elasticity of marginal abatement costs to unanticipated changes in aggregate consumption.

The following proposition can be interpreted as an application of the Consumption-based CAPM. We provide a formal proof of this proposition in the Appendix.

*Proposition 2. Suppose that relative risk aversion is constant and that the logarithms of aggregate consumption and marginal abatement costs follow a bivariate Brownian process. Then, the growth rate of the expected carbon price that supports the optimal temporal allocation of abatement efforts must be equal to the sum of three terms:*

- $\delta$ : the rate of natural decay of greenhouse gas in the atmosphere;
- $r_f$ : the interest rate in the economy;
- $\phi\pi$ : the abatement risk premium, which is the product of the income-elasticity of marginal abatement cost by the aggregate risk premium in the economy.

In short, we have that

$$g = \delta + r_f + \phi\pi, \quad (11)$$

where the interest rate  $r_f$  and the aggregate risk premium  $\pi$  are characterized in the Appendix. This result tells us that the CCAPM risk premium for carbon permits holds with a CCAPM "carbon beta" being equal to the income-elasticity  $\phi$  of the marginal abatement cost. This is related to Proposition 1 in which the statistical relationship between marginal abatement costs and aggregate consumption is summarized by  $\phi$ . An immediate consequence of Proposition 2 is described in the following corollary.

*Corollary 1. Under the assumptions of Proposition 2, the growth rate of expected carbon price should be larger (smaller) than the sum of the interest rate and the rate of decay of carbon dioxide if the income-elasticity of marginal abatement costs is positive (negative).*

Under the stochastic process (9)-(10), the estimation of the key parameter  $\phi$  is rather simple. Indeed, this system implies that

$$\Delta \log(A'_t) = a + \phi \Delta \log(C_t) + \varepsilon_t, \quad (12)$$

where  $\Delta \log(A'_t)$  and  $\Delta \log(C_t)$  are respectively changes in log marginal cost and in log consumption, and  $\varepsilon_t$  is an independent noise that is normally distributed. This means

that the OLS estimator of the slope of this linear equation is an unbiased estimator of the income-elasticity of the marginal abatement cost that must be used to determine the efficient growth rate of expected carbon price. The beauty of Proposition 2 compared to Proposition 1 is to provide a quantification of the effect of uncertainty on the efficient growth rate of the expected carbon price. When the assumptions of Proposition 2 are not satisfied, equation (11) can be obtained as an approximation where  $\phi$  is the local estimation of the income-elasticity of the marginal abatement cost along the optimal path.

## 2. The determinants of the income-elasticity of marginal abatement costs in a simple two-period model

Proposition 2 provides a simple characterization of the efficient growth rate of expected carbon price that relies on the income-elasticity of the marginal abatement cost. In this section, we explore the determinants of this income-elasticity. Because the current and future marginal abatement costs depend upon which intertemporal abatement strategy is used, this characterization requires solving the intertemporal carbon allocation problem. This cannot be easily done in a continuous-time framework. In this section, we solve this problem in a simple two-period framework. Suppose that the carbon budget constraint covers only two periods,  $t = 0$  and 1. The production of the consumption good is denoted  $Y_0$  and  $Y_1$  for periods 1 and 2 respectively, where  $Y_1$  is uncertain in period 0. The carbon intensity of the economy in the business-as-usual scenario in period  $t$  is denoted  $Q_t \geq 0$ , so that  $Q_t Y_t$  tons of carbon dioxide are emitted in period  $t$  under this scenario. The country is committed not to exceed a total emission target  $T$  for the two periods. As stated for example in the Paris Agreement, the long-term carbon budget allocated to the countries could be modified depending upon new scientific information about the intensity of the climate change problem for example. In our model, this means that, in period 0, there may be some uncertainty about what the intertemporal carbon budget  $T$  will be in the future.

Compared to the business-as-usual scenario, the country must choose how much to abate in each period. Let  $K_t$  denote the number of tons of carbon dioxide abated in period  $t$ , so that one can write the carbon budget constraint as follows:

$$e^{-\delta} (Q_0 Y_0 - K_0) + Q_1 Y_1 - K_1 \leq T, \quad (13)$$

where  $\delta$  is the rate of natural decay of carbon dioxide in the atmosphere. We hereafter assume that this carbon budget constraint is always binding, so that we can rewrite the abatement in period 1 as a function of the other variables:



$$K_1 = K_1(K_0, Y_1, T) = e^{-\delta} (Q_0 Y_0 - K_0) + Q_1 Y_1 - T. \quad (14)$$

Because  $Y_1$  and  $T$  are potentially uncertain, so is the abatement effort  $K_1$  in period 1 that will be necessary to satisfy the intertemporal carbon budget constraint.

Abating is costly. Let  $A_0(K_0)$  and  $A_1(K_1, \theta)$  denote the abatement cost function in periods 0 and 1 respectively. We assume that  $A_t$  is an increasing and convex function of  $K_t$ . In order to allow for technological uncertainty,  $A_1$  is a function of parameter  $\theta$ , which is unknown in period 0. Consumption in period  $t$  is  $C_t = Y_t - A_t$ .

The problem of the social planner is thus to select the abatement strategy  $(K_0, K_1)$  to maximize the intertemporal welfare function subject to the carbon budget constraint:

$$\max_{K_0, K_1} H(K_0, K_1) = u(Y_0 - A_0) + e^{-\rho} E[u(Y_1 - A_1)] \text{ s.t. } (14). \quad (15)$$

The first-order condition of this problem is written as follows:

$$A'_0 u'(Y_0 - A_0) = e^{-\rho - \delta} E[A'_1 u'(Y_1 - A_1)], \quad (16)$$

where  $A'_t$  denote the partial derivative of the total abatement cost function with respect to abatement  $K_t$ .

We know from Proposition 1 that the growth rate of the expected carbon price is larger (smaller) than the interest rate when the marginal abatement cost and aggregate consumption are (anti-)comonotone. In the remainder of this section, we examine various special cases that highlight some of the factors that determine whether the growth rate of expected carbon price should be larger or smaller than the interest rate plus the rate of natural decay of carbon dioxide. Suppose first that the only source of uncertainty in the economy is related to the exogenous growth of production  $Y_1$ . In particular, this means that  $\theta$  is certain, i.e., there is no uncertainty about the green technological progress. It also means that there is no uncertainty about the intertemporal carbon budget allocated to the country. The only source of correlation between  $A'_1$  and  $C_1$  comes from the fact that both random variables covary with  $Y_1$ . In that case, we have that

$$\frac{\partial A'_1}{\partial Y_1} = Q_1 A''_1(K_1, \theta),$$

which is positive. We also have that

$$\frac{\partial C_1}{\partial Y_1} = 1 - Q_1 A'_1(K_1, \theta).$$

We hereafter assume that  $Q_1 A'_1$  is smaller than unity. Although it is restrictive, this condition is intuitive, since it means that more production growth cannot be a bad news, in spite of the increased abatement effort necessary to compensate the extra emission generated by this production.  $Q_1 A'_1$  is the increased abatement cost necessary to compensate for the increased production growth in the business-as-usual scenario. This condition states that production growth always increases consumption, even after taking account of the increased abatement effort to compensate for it under the intertemporal carbon constraint. Thus, under this condition, the marginal abatement cost and aggregate consumption are comonotone. Using Proposition 1, this demonstrates the following proposition.

*Proposition 3. Suppose that the growth of aggregate production  $Y_1$  is the only source of uncertainty in the economy, and that  $Q_1 A'_1$  is smaller than unity. Then, it is socially desirable that the growth rate of expected carbon price be larger than the sum of the interest rate and the rate of decay of  $CO_2$ .*

A similar exercise can be done in a context where the only source of uncertainty is related to the intertemporal budget constraint  $T$ . In that case, a larger budget  $T$  implies a smaller abatement effort, and thus a larger share of production available for consumption rather than for abatement efforts. At the same time, because of the convexity of the cost function, the marginal abatement cost is smaller. Thus, aggregate consumption and marginal abatement cost are anti-comonotone. This yields the following result.

*Proposition 4. Suppose that the intertemporal carbon budget  $T$  is the only source of uncertainty in the economy. Then, it is socially desirable that the growth rate of expected carbon price be smaller than the sum of the interest rate and the rate of decay of  $CO_2$ .*

Suppose finally that the only source of uncertainty is about  $\theta$ , which is related to the speed of green technological progress. Suppose that an increase in  $\theta$  implies a reduction in both the total and the marginal abatement costs, i.e., that for all  $(K_1, \theta)$ ,

$$\frac{\partial A_1(K_1, \theta)}{\partial \theta} \leq 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial^2 A_1(K_1, \theta)}{\partial K_1 \partial \theta} \leq 0. \tag{17}$$

A possible illustration is when marginal abatement cost is an uncertain constant, i.e., when  $A_1(K_1, \theta)$  is equal to  $\alpha + g(\theta)K_1$  with  $g' \leq 0$ , a case examined by Baumstark and Gollier (2010). In that case, a small  $\theta$  means at the same time a large marginal abatement cost and a large total abatement cost, and thus a low aggregate consumption. Thus,  $A_1$  and  $C_1$  are anti-comonotone, thereby demonstrating the following proposition.

*Proposition 5. Suppose that the speed of green technological progress  $\theta$  is uncertain. If total and marginal abatement costs are comonotone (condition (17)), it is socially desirable that the growth rate of expected carbon price be smaller than the sum of the interest rate and the rate of decay of CO<sub>2</sub>.*

Up to this point, we only characterized the impact of uncertainty on the optimal growth rate of the carbon price. A more complete analysis would be to characterize its effect on the optimal abatement effort in the first period. This is a more difficult question. In order to address it, let us simplify the problem by assuming that the marginal abatement cost in period 1 is constant but potentially uncertain:  $A_1(K_1, \theta) = \theta K_1$ . In that case, aggregate consumption in period 1 equals

$$C_1 = Y_1 - \theta \left( e^{-\delta} (Q_0 Y_0 - K_0) + Q_1 Y_1 - T \right).$$

Observe that in that case, the first period abatement  $K_0$  has a role similar to saving in the standard consumption-saving problem. Each ton of CO<sub>2</sub> "saved" in the first period generates an increase in consumption by  $R = \exp(-\delta)\theta$  in the second period, where  $R$  can be interpreted as the rate of return of savings. Suppose first that  $\theta$  is certain. It is well-known in that case that the uncertainty affecting future incomes raises optimal (precautionary) saving if and only if the individual is prudent (Drèze and Modigliani (1972), Leland (1968), Kimball (1990)).<sup>12</sup> Applying this result to our context directly yields the following proposition. Notice that because the marginal abatement cost is certain, it must grow at the interest rate in this case.

*Proposition 6. Suppose that  $A_1(K_1, \theta) = \theta K_1$  and that the marginal abatement cost  $\theta$  is a known constant. Increasing risk on future production  $Y_1$  or on the intertemporal carbon budget  $T$  increases the initial abatement effort  $K_0$  if and only if the representative agent is prudent.*

<sup>12</sup> An individual is prudent if and only if the third derivative of  $u$  is positive.

When the marginal abatement cost is uncertain, the future return of abating more today becomes uncertain in that case. By risk aversion, this reinforces the willingness to abate in the first period because it also reduces the risk borne in the second period. Because of this second effect, prudence is sufficient but not necessary in this case.

*Proposition 7. Suppose that  $A_1(K_1, \theta) = \theta K_1$  and that the marginal abatement cost  $\theta$  is the only source of uncertainty. Increasing the risk affecting  $\theta$  raises the initial abatement effort  $K_0$  if the representative agent is prudent.*

Proof: Consider two random variables,  $\theta_1$  and  $\theta_2$ , where  $\theta_2$  is riskier than  $\theta_1$  in the sense of Rothschild and Stiglitz (1970). Let  $G_i(K_0) = H_i(K_0, K_1(K_0, Y_1, T))$  denote the corresponding objective function, as described by (15). Let  $K_{0i}$  denote the optimal initial abatement under distribution  $\theta_i$  of the marginal abatement cost. The optimal abatement effort  $K_{01}$  under the initial uncertainty  $\theta_1$  satisfies the first-order condition

$$A'_0(K_{01})u'(Y_0 - A_0(K_{01})) = \beta E[\theta_1 u'(Y_1 - \theta_1 K_{11})], \quad (18)$$

where  $K_{11}$  is the optimal abatement effort in period 1 under the initial risk  $\theta_1$ , i.e.,  $K_{11} = K_1(K_{01}, Y_1, T)$ . Because  $G_2$  is concave in  $K_0$ , we obtain that  $K_{02}$  is larger than  $K_{01}$  if and only if  $G'_2(K_{01})$  is positive. Using condition (18), this condition can be written as follows:

$$E[\theta_2 u'(Y_1 - \theta_2 K_{11})] \geq E[\theta_1 u'(Y_1 - \theta_1 K_{11})]. \quad (19)$$

This is true for any Rothschild-Stiglitz risk increase if and only if function  $v$  is convex, where  $v(\theta)$  equals  $\theta u'(Y_1 - \theta K_{11})$  for all  $\theta$  in the joint support of  $\theta_1$  and  $\theta_2$ . It is easy to check that

$$v''(\theta) = -2K_{11}u''(Y_1 - \theta K_{11}) + \theta K_{11}^2 u'''(Y_1 - \theta K_{11}). \quad (20)$$

Because  $K_{11}$  is positive and  $u''$  is negative, we see that  $v$  is convex when  $u'''$  is positive.

### 3. Calibration

In this section, we calibrate the two-period model described in the previous section. A standard approach to climate policy in the western world is based on the hypothesis that the energy transition should be performed within the next 3 decades in order to remain below the 2 °C objective. We follow for example Metcalf (2018) to decompose the next 3 decades into two periods of 15 years, 2021-2035 and 2036-2050. We examine the case of the European Union (EU-28). We hereafter describe the calibration of this model. We assume a rate of pure preference for the present equaling  $\rho = 0.5\%$  per year, and a constant relative risk aversion of  $\gamma = 3$ .

#### 3.1. Economic growth

The current annual GDP of EU-28 is around 19,000 billions USD (GUS\$). Assuming an annual growth rate of 1.4% per year over the period 2021-2035 yields a total production for this first period estimated at  $Y_0 = 315,000$  billions USD. The production  $Y_1$  of the second period is uncertain. A key element of this paper is that the recommended returns of green investments are compatible with the equilibrium returns of other assets in the economy, and with intertemporal social welfare. However, as is well-known, the CCAPM model that we use in this paper has been unable to predict observed asset prices when beliefs are normally distributed as assumed in Section sec CCAPM. This model yields an interest rate that is too large and an aggregate risk premium that is too low.<sup>13</sup> In this paper, we use the resolution of these asset pricing puzzles that has been proposed by Barro (2006), who recognized the possibility of infrequent large recessions that are not well represented in U.S. growth data. We follow the calibration proposed by Martin (2013). The production in the first period of 15 years is normalized to unity. The change in log production during the second subperiod is equal to the sum of 15 independent draws of an annual growth rate  $x_i$  whose distribution compounds two normally distributed random variables:

$$\log\left(\frac{Y_1}{Y_0}\right) = \sum_{i=1}^{15} x_i \quad (21)$$

$$x_i \sim (h_{bau}, 1-p; h_{cat}, p) \quad (22)$$

$$h_{bau} \sim N(\mu_{bau}, \sigma_{bau}^2) \quad (23)$$

<sup>13</sup> See for example Kocherlakota (1996) and Cochrane (2017).

$$h_{cat} \sim N(\mu_{cat}, \sigma_{cat}^2). \quad (24)$$

With probability  $1 - p$ , the annual growth rate is drawn from a "business-as-usual" normal distribution with mean  $\mu_{bau}$  and volatility  $\sigma_{bau}^2$ . But with a small probability  $p$ , the annual growth rate is drawn from a "catastrophic" normal distribution with a large negative  $\mu_{cat}$  and a large volatility  $\sigma_{cat}^2$ . In Table 1, we describe the value of the parameters of the model that are used as a benchmark. The order of magnitude of the parameters of the production growth process is in the range of what has been considered by Barro (2006) and Martin (2013). The annual probability of a macroeconomic catastrophe is fixed at 1.7%, and the expected annual drop in production is assumed to be 35% in that case. The calibration of these parameters is detailed in Table 1. It yields an annual trend of growth of 1.37% and an expected production of  $Y_1 = 387,000$  billions USD (GUS\$) in the second period.

### 3.2. Emissions and decay

The EU-28 currently emits 4.4 GtCO<sub>2</sub>e per year. Under the Business-As-Usual (BAU), we assume that this flow is maintained over each of the 15 years of the first period, implying 66 GtCO<sub>2</sub>e emitted in this scenario. When compared to the production  $Y_0$  estimated above, this yields a carbon intensity of  $Q_0 = 2.10 \times 10^{-4}$  GtCO<sub>2</sub>e/GUS\$. Even without any mitigation policy, the world economy have benefitted from a natural reduction of the energy intensity of its global production over the recent decades. According to Clarke et al. (2014), the average of decline of the energy intensity has been approximately 0.8% per year. This is why we assume in this calibration exercise that the carbon intensity in the second period goes down to  $Q_1 = 1.85 \times 10^{-4}$  GtCO<sub>2</sub>e/GUS\$ in the BAU. This implies an expected total emission of around 72 GtCO<sub>2</sub>e in the second period in the BAU.

There exists an intense debate about the half-life of carbon dioxide in the atmosphere, and thus on its rate of natural decay. It appears that the carbon cycle is highly non linear, and involves complex interactions between the atmosphere and different layers of the oceans. The existing literature on the half-life of carbon dioxide offers a wide range of estimates, from a few years to several centuries.<sup>14</sup> We conservatively assume a rate of natural decay of CO<sub>2</sub> in the atmosphere of 0.5% per year. This implies a total expected emission net of the natural decay for the European Union over the period 2021-2050 in the BAU around 133 GtCO<sub>2</sub>e.

<sup>14</sup> For a survey on this matter, see Archer et al. (2009).

### 3.3. Carbon budget

In the fifth report of the IPCC (Clarke et al. (2014)), it is estimated that a 450 ppm concentration of greenhouse gases should not be exceeded in order to achieve the goal of not exceeding a 2 °C increase in temperature compared to the pre-industrial age. That implied a remaining carbon budget around 950 GtCO<sub>2</sub>e. Given that we have emitted around 40 Gt of greenhouse gases per year since then, we assume that this global carbon budget has now been reduced to 750 Gt. There is a debate about how to share this total carbon budget among the different countries. Let us take the conservative (and ethically sounded) approach of sharing the budget on a per capita basis. Because the European Union is home for roughly 7% of the world population, we assume that EU-28 should be allocated a carbon budget of approximately 50 GtCO<sub>2</sub>e. Let us further assume that four-fifth of this budget could be consumed between 2021 and 2050. This gives an expected carbon budget for EU-28 for that period equalling  $\mu_T = 40$  GtCO<sub>2</sub>e. Compared to the global emission of 133 GtCO<sub>2</sub>e, this represents a global abatement effort of 93 GtCO<sub>2</sub>e, or a reduction of more than 70% of the global BAU emissions in the EU-28 during the next 3 decades.

There is of course much uncertainty about what will be the actual carbon budget that will emerge from the international negotiations in the next 3 decades. We model this uncertainty by assuming that  $T$  is normally distributed with mean  $\mu_T$  and standard deviation  $\sigma_T = 10$  GtCO<sub>2</sub>e.

### 3.4. Abatement costs

We assume that the abatement cost function is quadratic:

$$A_t(K_t) = a_t K_t + \frac{1}{2} b K_t^2.$$

An important element of our model is related to how the marginal abatement cost (MAC) changes with the ambition of the mitigation policy. The answer to this question is given by the MAC slope coefficient  $b$ , which tells us by how much the marginal abatement cost increases when the abatement effort increases by 1 Gt of CO<sub>2</sub>e. The researchers behind the MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA, Morris et al. (2012)) have developed computable general equilibrium models with a very detailed energy sector. They have estimated the shadow price of carbon associated to various carbon budgets for different regions of the world, thereby generating regions-specific MAC curves. We used their analysis of the MAC curve for the European Union in 2020 to estimate that the MAC increases by 25 USD whenever the annual abatement effort is increased by 1

GtCO<sub>2</sub>e. Expressed for a period of 15 years, this suggests  $b = 1.67$  GUS\$/GtCO<sub>2</sub>e<sup>2</sup>. We assume that  $b$  is certain and constant over time.

Parameter  $a_t$  measures the MAC along the BAU scenario. For the first period, we estimate it by price of carbon permit in the summer of 2018 on the EU-ETS market, around 23 GUS\$/ GtCO<sub>2</sub>e. The full elimination of the 66 GtCO<sub>2</sub>e emitted in the first period would cost around 5,000 GUS\$, or 1.6% of GDP in the first period.

**Table 1 – Benchmark calibration of the two-period model**

parameter	value	description
$\rho$	0.5%	annual rate of pure preference for the present
$\gamma$	3	relative risk aversion
$Y_0$	315,000	production in the first period (in GUS\$)
$p$	1.7%	annual probability of a macroeconomic catastrophe
$\mu_{bau}$	2%	mean growth rate of production in a business-as-usual year
$\sigma_{bau}$	2%	volatility of the growth rate of production in a business-as-usual year
$\mu_{cat}$	-35%	mean growth rate of production in a catastrophic year
$\sigma_{cat}$	25%	volatility of the growth rate of production in a catastrophic year
$\delta$	0.5%	annual rate of natural decay of CO <sub>2</sub> in the atmosphere
$Q_0$	$2.10 \times 10^{-4}$	carbon intensity of production in period 0 (in GtCO <sub>2</sub> e/GUS\$)
$Q_1$	$1.85 \times 10^{-4}$	carbon intensity of production in period 1 (in GtCO <sub>2</sub> e/GUS\$)
$\mu_T$	40	expected carbon budget (in GtCO <sub>2</sub> e)
$\sigma_T$	10	standard deviation of the carbon budget (in GtCO <sub>2</sub> e)
$b$	1.67	slope of the marginal abatement cost functions (in GUS\$/GtCO <sub>2</sub> e <sup>2</sup> )
$a_0$	23	marginal cost of abatement in the BAU, first period (in GUS\$/GtCO <sub>2</sub> e)
$\mu_\theta$	2.30	expected future log marginal abatement cost in BAU
$\sigma_\theta$	1.21	standard deviation of future log marginal abatement cost in BAU

The MAC in the BAU in the second period is uncertain. Anticipating green innovations would suggest using  $a_1$  smaller than  $a_0$ , at least in expectation. By how much smaller remains an open question. In order to estimate the degree of uncertainty that surrounds abatement costs in the second period of our analysis, we have used a set of AIM models scrutinized by the Working Group III for the Fifth Report of the IPCC (Clarke et al. (2014)). In the associated database, we have collected 374 estimations of the carbon price estimates for 2030 that are in line with the objective of not exceeding 450 ppm over the century. These estimates differ by the IAM model used for the estimation, and by the assumed technological progresses available at that time horizon. We depict the histogram of these MAC estimates for 2030 in Figure 1. The distribution of these estimates is heavily skewed to the right, which suggests using a lognormal distribution



for  $a_1 = \theta$ . The standard deviation of the log MAC in this sample is equal to  $\sigma_\theta = 1.21$ .<sup>15</sup> In this benchmark calibration, we assume that  $\log(\theta)$  is lognormally distributed with mean  $\mu_\theta = 2.30$  and  $\sigma_\theta = 1.21$ . This yields an expected MAC in the BAU around 18 GUS\$/GtCO<sub>2</sub>e. The 20% reduction in the expected MAC under the BAU between the two periods measures the green innovations that are expected to emerge in the next 15 years. The standard deviation of the future MAC at the BAU is equal to 38 US\$/tCO<sub>2</sub>e, which is in the range of the MAC uncertainty measured by Kuik et al. (2009) for a time horizon of 15 years.<sup>16</sup>

**Table 2 – Description of the optimal solution in the benchmark case**

variable	value	description
$K_0$	31	optimal abatement in the first period (in GtCO <sub>2</sub> e)
$E[K_1]$	66	optimal expected abatement in the second period (in GtCO <sub>2</sub> e)
$p_0$	75	optimal carbon price in the first period (in US\$/tCO <sub>2</sub> e)
$g$	3.47%	annualized growth rate of expected carbon price
$r_f$	1.14%	annualized interest rate
$\pi$	2.42%	annualized systematic risk premium
$\phi$	1.04	OLS estimation of the income-elasticity of the marginal abatement cost

### 3.5. Results

We solved the first-order condition (16) numerically by using the Monte-Carlo method. We draw 100.000 random triplets  $(Y_1, \theta, T)$  that we approximated the expectation of the right-hand side of this equality by an equally weighted sum of this random sample. In Table 2, we describe the optimal solution of this problem under the calibration of the parameters described in Table 1. We obtain equilibrium asset prices that are in line with the observed real interest rate of 1% and systematic risk premium of 2% that have been observed in the United States during the last century (Kocherlakota (1996)). The optimal abatement is much larger in the second period than in the first one. This is partly due to the anticipation of a larger price of carbon in the second period. In expectation, the annualized growth rate of the carbon price equals 3.47%. This is much larger than the sum of the natural rate of decay of CO<sub>2</sub> and the interest rate, which is equal to 1.64%. This is due to the fact that at the optimum, the marginal abatement cost is positively

<sup>15</sup> Because these estimates are based on an ambitious abatement target, the mean value of the carbon price in this sample is not useful for the estimation of the expected MAC in the BAU.

<sup>16</sup> These authors performed a meta-analysis of MAC estimates in the literature, and observed a standard deviation of MAC of 27.9 and 52.9 euros per tCO<sub>2</sub>e respectively for 2025 and 2050.

correlated with aggregate consumption, as shown in Figure 2. In fact, the OLS estimation of the income-elasticity of the marginal abatement cost is  $\phi \simeq 1.04$ .<sup>17</sup>

As observed by Metcalf (2018), Aldy (2017) and M. et al. (2017), carbon price predictability is the most important feature of a climate policy for the business community as it plans long-term investments in line with the energy transition. For example, Metcalf (2018) proposes to fix the annual growth rate of carbon price at 4% (plus inflation) as long as the path of emissions is in line with the objective. However, under uncertainty, the efficient growth rate of carbon price must be uncertain in this model because the resolution of the uncertainty affecting economic growth, green innovations and the carbon budget needs to be translated into a variable carbon price in the second period. We represented the distribution of the annualized growth rate of carbon price in Figure 3. Its standard deviation is equal to 2.4% per annum. Contrary to the above-mentioned view, it is desirable that this risk be borne by the business community. It reflects the uncertainties of the social benefits of the climate policy. Investment decisions in energy transition should take account of these uncertainties. The attractiveness of green investments should be based on their expected return rather than its reduced risk, something that cannot be guaranteed under a rigid carbon budget.

### 3.6. Sensitivity analysis

Table 3 provides some information about the sensitivity of our results to the intensity of the exogenous risk of the model. In the third column entitled "no catastrophe", we have solved the model by using the benchmark calibration except for the probability of catastrophe  $p$  to have been switched to zero. Because that change has the undesirable consequence to increase the expected growth of production, we have reduced the trend of growth  $\mu_{bau}$  to 1.37% in order to leave  $E[Y_1]$  unchanged. This has the effect to raise the interest rate and to reduce the systematic risk premium to unrealistic levels. This observation justifies our choice of introducing macroeconomic catastrophes à la Barro in our calibration. The consequence of reducing the macro risk is to make the growth rate of expected carbon price smaller than the sum of the interest rate and the rate of natural decay, as suggested by our theoretical results. However, because the systematic risk premium is marginal in the absence of catastrophe, the difference between the two is small, as suggested by equation (29), which is an approximation in this non-gaussian calibration.

<sup>17</sup> Because consumption and marginal abatement costs are not log normal, equation (29) cannot be used to estimate the optimal growth rate of expected carbon price. If we use it as an approximation with  $\delta = 0.5\%$ ,  $r_f = 1.14$ ,  $\pi = 2.42\%$  and  $\phi = 1.04$ , we would obtain  $g \simeq 4.16\%$ .

**Table 3: Sensitivity analysis.** The "no catastrophe" context is obtained by shifting the probability of catastrophe  $p$  to zero, and by reducing the trend of growth to  $\mu_{bau}$  to 1.37% to preserves the expected growth rate of production as in the benchmark. The "no macro risk" context combines these changes with the shift of the volatility  $\sigma_{bau}$  to zero. In the "no tech risk" context, we switched  $\sigma_{\theta}$  to zero compared to the benchmark. In the "no budget risk" case, we reduced  $\sigma_T$  to zero compared to the benchmark.

variable	benchmark	no catastrophe	no macro risk	no tech risk	no budget risk
$K_0$	31	26	26	28	31
$E[K_1]$	66	69	69	69	67
$p_0$	75	67	66	70	74
$g$	3.47%	4.61%	4.77%	3.77%	3.60%
$r_f$	1.14%	4.31%	4.49%	1.04%	1.12%
$\pi$	2.42%	0.13%	0.00%	2.51%	2.42%
$\phi$	1.04	0.66	-25	1.04	0.96

In the last two columns of Table 3, we document the results of simulations in which risks on technological progress  $\theta$  and on the carbon budget  $T$  are respectively switched off. Because these effects are marginal, these results suggest that the main argument for a departure of the Hotelling's rule  $g = \delta + r_f$  comes from the macroeconomic uncertainty, not from technological risks or from carbon budget risks.

## Conclusion

In a decentralized economy, fighting climate change should be implemented by providing the right price signals to consumers and investors. The level of the carbon price determines the intensity of the effort to reduce emissions, whereas the growth rate of this price determines the allocation of this effort over time. Under an intertemporal carbon budget constraint, assuming no decay of carbon dioxide in the atmosphere, the growth rate of the carbon price is also the return of the action to reduce emissions earlier. In the benchmark case in which marginal abatement costs are certain, such frontloading of climate effort is a safe investment strategy that should be remunerated at the interest rate. This observation supports the celebrated Hotelling's result that carbon price should grow at the interest rate, under certainty. This implies that green projects will be evaluated by the private sector by using the interest rate as the rate at which future benefits of these projects should be discounted.

In this paper, we have examined the impact of the deep uncertainties surrounding the energy transition on this Hotelling's result. If marginal abatement costs are negatively correlated with aggregate consumption, frontloading climate efforts provides a hedge

against the macroeconomic risk, because the saved future mitigation costs are larger when future aggregate consumption is smaller. Mitigation frontloading has a negative CCAPM beta in that case. Because of their insurance benefits, investors will be too eager to invest in these technologies if the growth rate of expected carbon price is equal to the interest rate. This cannot be an equilibrium. At equilibrium, the growth rate of expected carbon price must be made smaller than the interest rate. This risk-adjustment is socially desirable. It induces investors to use a smaller discount rate to evaluate mitigation investments, which reflects the collective insurance benefit of frontloading. On the contrary, when marginal abatement costs are positively correlated with aggregate consumption, this growth rate must be made larger than the interest rate. It is socially desirable that investors use such a discount rate larger than the interest rate because mitigation frontloading raises the macroeconomic risk in that case, which yields a positive CCAPM beta of mitigation frontloading.

The CCAPM beta of mitigation frontloading is equal to the income-elasticity of marginal abatement costs. We identified different channels that influence this beta. The negative beta channel is active when the main source of the uncertainty comes from innovations in green technologies. In that case, a strong wave of innovations will drive marginal abatement cost downwards and it will at the same time increase consumption net of the mitigation effort. A positive beta channel is active when the main source of uncertainty comes from economic growth. When growth is larger than expected, aggregate consumption will be larger and marginal abatement cost will also be larger, because the mitigation effort must be increased to compensate for the larger emissions generated by the expanded production of goods and services. When these two sources of uncertainty are combined, the sign of the CCAPM beta of mitigation frontloading is thus generically ambiguous.

## References

Aldy, J. (2017): Designing and updating a U.S. carbon tax in an uncertain world, *Harvard Environmental Law Review*, 41, 28-40.

Archer, D., M. Eby, V. Brovkin, A. Ridgwell, L. Cao, U. Mikolajewicz, K. Caldeira, K. Matsumoto, G. Munhoven, A. Montenegro, and K. Tokos (2009): Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37, 117-134.

Barro, R. (2006): Rare Disasters and Asset Markets in the Twentieth Century, *Journal of Finance*, 121, 823-866.

Baumstark, L. and C. Gollier (2010): La dynamique de la valeur carbone dans un cadre incertain, TSE Working paper.

Breeden, D. (1979): An intertemporal asset pricing model with stochastic consumption and investment opportunities *Journal of Financial Economics*, 7, 265-296.

Chakravorty, U., B. Magné, and M. Moreaux (2006): A Hotelling model with a ceiling on the stock of pollution, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 30, 2875-2904.

Chakravorty, U., M. Moreaux, and M. Tidball (2008): Ordering the extraction of polluting non renewable resources, *American Economic Review*, 98, 1128-1144.

Clarke, L., K. Jiang, K. Akimoto, B. M., G. Blanford, K. Fisher-Vanden, J.-C. Hourcade, V. Krey, E. Kriegler, A. Loschel, D. McCollum, S. Paltsev, S. Rose, P. R. Shukla, M. Tavoni, B. C. C. van der Zwaan, and D. van Vuuren (2014): Assessing transformation pathways, in *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlomer, C. von Stechow, T. Zwickel, and J. Minx, Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Cochrane, J. (2017): Macro-finance, *Review of Finance*, 945--985.

Dietz, S., C. Gollier, and L. Kessler (2018): The climate beta, *Journal of Environmental Economics and Management*, 87, 258-274.

Drèze, J. and F. Modigliani (1972): Consumption decisions under uncertainty, *Journal of Economic Theory*, 5, 308--335.

Gollier, C. (2001): *The economics of risk and time*, MIT Press.

Gollier, C. and J. Tirole (2015): Negotiating effective institutions against climate change, *Economics of Energy and Environmental Policy*, 4, 5-27.

Hafstead, M., G. E Metcalf, and R. C. Williams III (2017): Adding Quantity Certainty to a Carbon Tax: The Role of a Tax Adjustment Mechanism for Policy Pre-Commitment, *Harvard Environmental Law Review*, 41, 41--57.

Hotelling, H. (1931): The economics of exhaustible resources, *Journal of Political Economy*, 39, 137-175.

Interagency Working Group on the Social Cost of Greenhouse Gases (2013, Revised August 2016): Technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis under executive order 12866, Tech. rep., Washington: Executive Office of the President.

Kimball, M. (1990): Precautionary saving in the small and in the large, *Econometrica*, 58, 53--73.

Kocherlakota, N. (1996): The equity premium: It's still a puzzle, *Journal of Economic Literature*, 34, 42-71.

Kuik, O., L. Brander, and S. Tol (2009): Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis, *Energy Policy*, 37, 1395-1403.

Laffont, J. and J. Tirole (1996): Pollution Permits and Compliance Strategies, *Journal of Public Economics*, 62, 85-125.

Leland, H. (1968): Savings and uncertainty: The precautionary demand for savings, *Quarterly Journal of Economics*, 45, 621-636.

Lucas, R. (1978): Asset prices in an exchange economy, *Econometrica*, 46, 1429-46.

Martin, I. (2013): Consumption-based asset pricing with higher cumulants, *Review of Economic Studies*, 80, 745-773.

Mehra, R. and E. C. Prescott (1985): The Equity Premium: A Puzzle, *Journal of Monetary Economics*, 15, 145-161.

Metcalf, G. (2018): An emissions assurance mechanism: Adding environmental certainty to a carbon tax, *Resources for the future Report*.

Morris, J., S. Paltsev, and J. Reilly (2012): Marginal abatement costs and marginal welfare costs for greenhouse gas emissions reductions: Results from the EPPA model, *Environmental Modeling and Assessment*, 17, 325-336.

Pindyck, R. (2013): Climate change policy: What do the models tell us? *Journal of Economic Literature*, 51, 860-872.

Rothschild, M. and J. Stiglitz (1970): Increasing Risk I: A definition, *Journal of Economic Theory*, 2, 225-243.

Rubinstein, M. (1976): The valuation of uncertain income streams and the pricing of options, *The Bell Journal of Economics*, 7, 407-425.

Schubert, K. (2008): La valeur carbone: Niveau initial et profil temporel optimaux, Paris School of Economics.

Van der Ploeg, F. and C. Withagen (2014): Growth, renewables, and the optimal carbon tax, *International Economic Review*, 55, 283-311.

Weil, P. (1989): The equity premium puzzle and the risk-free rate puzzle, *Journal of Monetary Economics*, 24, 401-421.

## Appendix: Proof of Proposition 2

Under these two assumptions, combining equation (7) with the property that at equilibrium  $\exp(g_t t)$  equals  $EA'_t / A'_0$  implies the following equation:

$$1 = e^{-(\rho+\delta)t} E \left[ \frac{A'_t u'(C_t)}{A'_0 u'(C_0)} \right] = e^{-(\rho+\delta)t} E [\exp(a'_t - \gamma c_t)].$$

Notice that our assumptions implies that  $a'_t - \gamma c_t$  is normally distributed with mean  $\mu_p - \gamma \mu_c$  and variance  $(1 - \gamma \phi)^2 \sigma_c^2 + \sigma_w^2$ . By Stein's Lemma, the above condition can then be rewritten as follows:

$$1 = \exp \left( (-\rho - \delta + \mu_p - \gamma \mu_c + 0.5(\phi - \gamma)^2 \sigma_c^2 + 0.5\sigma_w^2) t \right),$$

or, equivalently,

$$\mu_p + 0.5\phi^2 \sigma_c^2 + 0.5\sigma_w^2 = \delta + \rho + \gamma \mu_c - 0.5\gamma^2 \sigma_c^2 + \phi \gamma \sigma_c^2. \quad (26)$$

In this economy, the following standard CCAPM formula for the risk-free interest rate can be derived from equation (4):

$$r_{ft} = r_f = \gamma + \gamma \mu_c - 0.5\gamma^2 \sigma_c^2. \quad (27)$$

The systematic risk premium  $\pi_t$  is given by equation (6). Using Stein's Lemma twice to estimate  $r_{ct}$  given by equation (5) yields the following result:

$$\pi_t = \pi = \gamma \sigma_c^2. \quad (28)$$

Notice also that, using Stein's Lemma again, we have that the expected marginal abatement cost satisfies the following condition:

$$E \frac{A'_t}{A'_0} = E \exp(a'_t) = \exp \left( (\mu_p + 0.5\phi^2 \sigma_c^2 + 0.5\sigma_w^2) t \right).$$

This implies that the growth rate  $g$  of expected marginal abatement cost is a constant given by

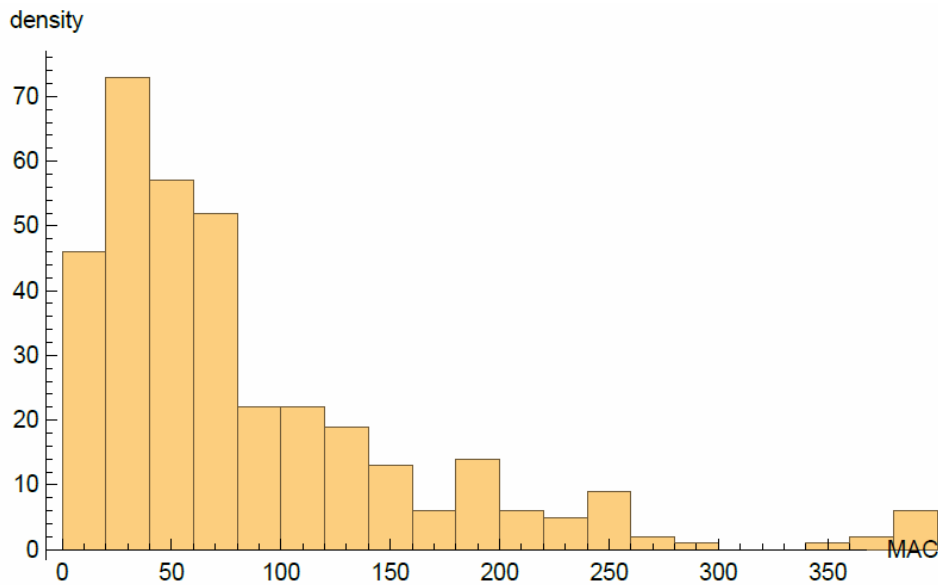
$$g = \frac{dEA'_t/dt}{EA'_t} = \mu_p + 0.5\phi^2 \sigma_c^2 + 0.5\sigma_w^2.$$

Because in a decentralized economy, the marginal abatement cost is equal to the price of carbon in all states of nature and at all dates,  $g$  can also be interpreted as the growth rate of expected carbon price. Combining these properties implies that one can rewrite condition (26) as follows:

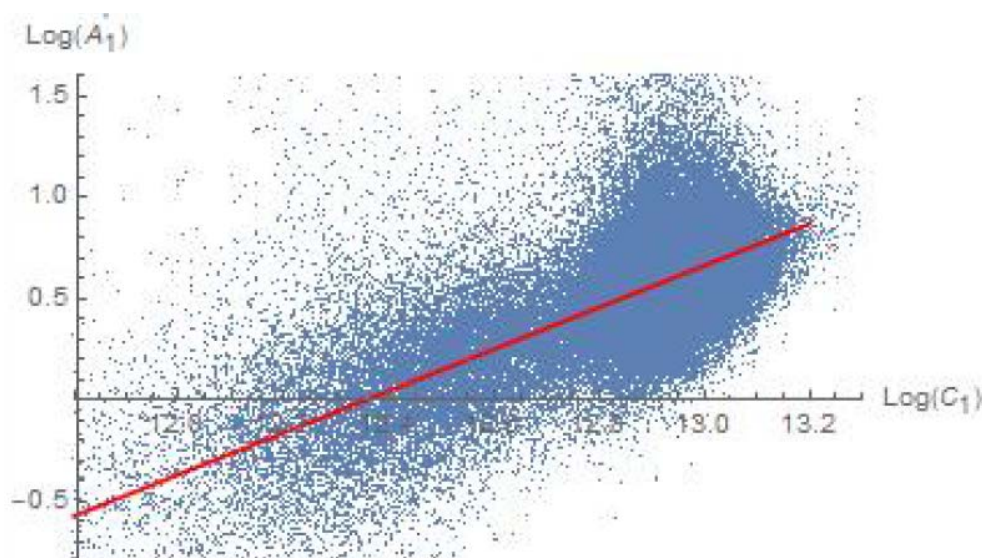
$$g = \delta + r_f + \phi \pi. \quad (29)$$

This concludes the proof of Proposition 2.

**Figure 1:** Histogram of the world marginal abatement costs for 2030 extracted from the IPCC database (<https://tntcat.iiasa.ac.at/AR5DB>). We have selected the 374 estimates of carbon prices (in US\$2005/tCO<sub>2</sub>) in 2030 from the IAM models of the database compatible with a target concentration of 450 ppm.

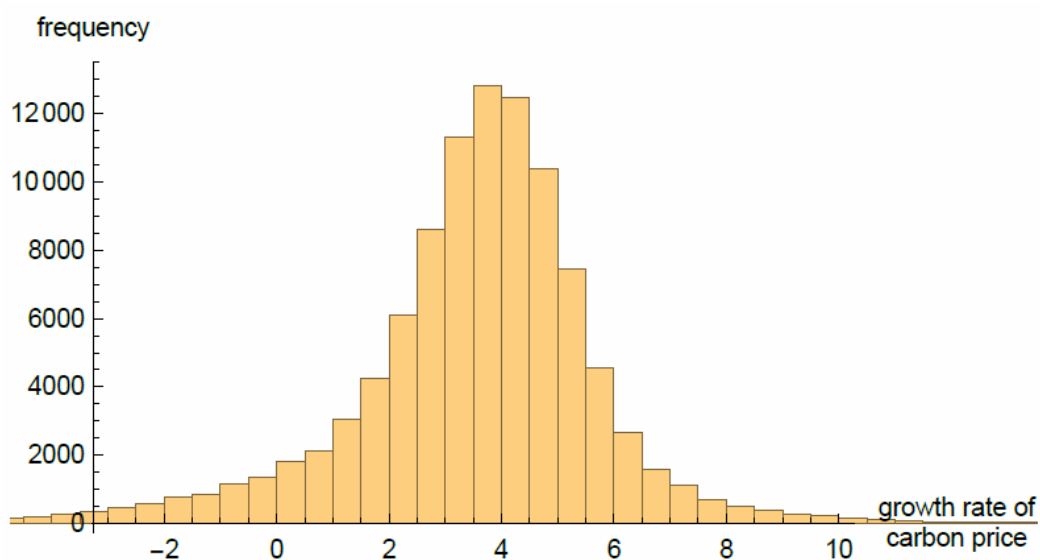


**Figure 2:** Monte-Carlo simulation under the benchmark case. We used 100.000 draws of the triplets  $(Y_t, \theta, T)$  to estimate the optimal abatement strategy. The figure illustrates the positive statistical relation between log consumption growth and the log marginal abatement costs (and thus log carbon price) in the second period. The red curve depicts the OLS estimation in log-log, yielding  $\log(A_1') = -12.8 + 1.04 \log(C_1) + \varepsilon$ .





**Figure 3:** Empirical probability distribution of the annualized growth rate of carbon price under the optimal abatement strategy in the benchmark calibration of the two-period model. The Monte-Carlo simulation uses a sample of 100.000 draws of the triplet  $(Y_t, \theta, T)$ . The growth rate is in percent per year. The mean growth rate is 3.47% and the standard deviation is equal to 2.4%.







## COMPLÉMENT 4

# USAGE DE LA VTC ET DÉCENTRALISATION DES DÉCISIONS

---

Émile Quinet<sup>1</sup>

L'objet de cette note est de montrer dans un cadre simple comment les variables ou fonctions duales données par une optimisation macroéconomique peuvent fournir des valeurs de valeur tutélaire du carbone (VTC) qui, fournies aux acteurs décentralisés porteurs de projet, leur permettent de prendre les bonnes décisions, c'est-à-dire de décider de leurs projets selon les modalités définies par l'optimisation macroéconomique d'ensemble. On développe dans ce but un modèle simple, qui s'efforce de reproduire certains des traits de Le Hir, Pommeret et Salin, mais fondé sur la programmation linéaire, ce qui permet de multiplier le nombre des agents créateurs d'abattement et de prendre en compte leurs comportements individuels, fondés sur leurs intérêts propres. On suppose qu'il n'y a pas de progrès technique, et on se place en avenir certain, avec un horizon « très long » comportant un grand nombre de périodes.

Dans une première section, on se place dans la situation où les entreprises réalisant des abattements sont nombreuses et chacune de petite taille, et opèrent à rendement constant. La deuxième section aborde le cas où à chaque période existe une seule entreprise à rendements décroissants. Dans chacun de ces deux cadres, on se place dans deux situations de contraintes : contraintes de stock et contraintes de flux ; on cherche d'abord à caractériser l'optimum d'ensemble (consistant en la minimisation des coûts d'abattement actualisés), ce qui fait apparaître des variables duales ; puis on montre que l'on peut, à partir de ces variables duales, définir des VTC telles que chaque opérateur individuel, confronté à cette VTC (soit comme une valeur tutélaire pour un opérateur public, soit comme un prix à payer ou à recevoir pour un opérateur privé),

---

<sup>1</sup> Conseiller scientifique, France Stratégie

règle son action selon le principe de la main invisible, en concourant par ses décisions à la réalisation de l'optimum collectif. Une troisième section esquisse des pistes de prolongement des réflexions sur le sujet.

## 1. Cas d'un grand nombre d'opérateurs de petite taille

On est en présence de  $I$  opérateurs indicés  $i$ , chacun d'eux abattant une unité de GES par période, jusqu'à la fin des temps, avec un coût d'investissement  $c(i)$  et des coûts d'exploitation annuels nuls. On suppose en outre que les opérateurs sont classés par ordre de coût croissant : l'entreprise d'indice 1 est celle qui a le coût  $c(1)$  le plus bas, l'entreprise d'indice 2 a le second coût le plus bas, etc.

### 1.1. Cadre commun

Soient :

- $a(t)$  : l'investissement en abattement en  $t$  ( $a(t)$  opérateurs entrent sur le marché en  $t$ ) ;
- $A(t)$  : la capacité d'abattement installé à la fin de la période  $t$ . On a  $A(t)=A(t-1)+a(t)$  ;
- $Y(t)$  : le PIB de l'année  $t$ , supposé exogène ;
- $B*Y(t)$  : les émissions brutes liées au PIB au cours de l'année  $t$ ,  $B$  étant un paramètre fixe ;
- $E(t)$  : les émissions nettes au cours de la période  $t$ , différence entre les émissions brutes proportionnelles au PIB :  $E(t)=B*Y(t)-A(t)$  ;
- $S(t)$  : le stock de GES, qui vérifie :  $S(t)=S(t-1)+E(t)$ .

En utilisant les relations de récurrence définissant  $A(t)$  et  $S(t)$ , et en posant pour simplifier que les valeurs initiales de ces variables sont nulles, on aboutit aux relations suivantes :

$$A(t) = \sum_{\theta=1}^{\theta=t} a(\theta) \quad (1)$$

$$S(t) = B \sum_{\theta=1}^{\theta=t} Y(\theta) - \sum_{v=1}^{v=t} (t-v)a(v) \quad (2)$$

$$E(t) = BY(t) - \sum_{v=1}^{v=t} a(v) \quad (3)$$

Pour poser le programme d'optimisation, on introduit les variables  $x(i,t)$  égales à 1 si l'investissement de rang  $i$  est réalisé en  $t$ , et à 0 autrement. On a donc :

$$a(t) = \sum_i x(i,t) \quad (4)$$

Les contraintes s'exerçant sur les  $x(i,t)$  sont les suivantes :

$-x(i, t) \leq 0$  (variable duale :  $\rho(i, t)$  ; elle est nulle si l'investissement  $i$  est réalisé en  $t$ , positive autrement)

$\sum_t x(i, t) - 1 \leq 0$  (variable duale :  $\lambda(i)$  ; elle est nulle si l'investissement  $i$  n'est jamais réalisé, positive s'il est réalisé)

S'y ajoutent :

- soit les contraintes de stock maximal  $S$  :

$$S(t) - S = B \sum_{\theta=1}^{\theta=t} Y(\theta) - \sum_{v=1}^{v=t} (t - v) \sum_i x(i, v)$$

variable duale :  $\mu(t)$  ; elle est nulle tant que la contrainte n'est pas atteinte, positive quand la contrainte est atteinte) ;

- soit les contraintes de flux d'émission net maximal  $H(t)$  :

$$E(t) - H(t) = BY(t) - \sum_{v=1}^{v=t} \sum_i x(i, v) - H(t) \leq 0 \quad (\text{variable duale : } \mu(t))$$

La fonction à maximiser est :

$$- \sum_{i,t} x(i, t) \frac{c(i)}{(1+j)^t}$$

où  $j$  est le taux d'actualisation.

La dérivation du lagrangien donne les résultats suivants :

## 1.2. Avec contraintes de flux

$$- \frac{c(i)}{(1+j)^t} + \rho(i, t) - \lambda(i) + \sum_{v \geq t} \mu(v) = 0$$

$$\lambda(i) = \left[ \sum_{v \geq t} \mu(v) - \frac{c(i)}{(1+j)^t} \right] + \rho(i, t) \quad (5)$$

Ces relations définissent, avec les données initiales, les valeurs des variables  $x(i, t)$  qui donnent la solution optimale. Cette solution optimale donne pour chaque projet sa date

de réalisation. Par exemple, pour le projet  $i$ , sa date de réalisation  $\theta$  est telle que  $\rho(i, \theta) = 0$  et pour cette date optimale, l'expression entre crochets est maximale et égale à  $\lambda(i)^2$ .

Cette décision peut être obtenue par un processus de décentralisation. Pour cela définissons une VTC égale à :

$$VTC(t) = \mu(t)(1+j)^t$$

Et fixons une règle imposant à l'opérateur individuel de maximiser la VAN de son projet à partir de cette série de VTC (soit qu'il s'agisse d'un opérateur public auquel on impose cette règle de choix, soit qu'il s'agisse d'un opérateur privé à la recherche du profit maximum et pour lequel, par un moyen ou un autre, on fait gagner une VTC pour chaque unité d'abattement).

Alors l'opérateur calculera une VAN qui sera l'expression entre crochets de la formule (5) et cherchera à la maximiser, ce qui évidemment le conduira à choisir la date de réalisation  $\theta$ .

Ainsi l'optimisation qu'opère le porteur de projet auquel on a donné les valeurs tutélaires  $VTC(t)$  le conduit à réaliser l'investissement dont il est porteur à la date qui est optimale d'un point de vue collectif.

### 1.3. Avec contraintes de stock

La dérivation du Lagrangien aboutit à :

$$-\frac{c(i)}{(1+j)^t} + \rho(i, t) - \lambda(i) + \sum_{v \geq t} \mu(v)(v - t) = 0$$

$$\lambda(i) = \left[ \sum_{v \geq t} \mu(v)(v - t) - \frac{c(i)}{(1+j)^t} \right] + \rho(i, t) \quad (6)$$

Si on suppose que la contrainte de stock n'est pas saturée jusqu'à une année  $T$ , alors les variables duales  $\mu(t)$  sont nulles tant que  $t < T$  ; on supposera en outre que lorsque  $t > T$ , la contrainte de stock reste saturée, et que les  $\mu(t)$  sont donc strictement positifs. Alors  $\lambda(i)$  peut s'écrire :

$$\lambda(i) = \left[ -\frac{c(i)}{(1+j)^t} + (T - t) \sum_{u \geq T} \mu(u) + \sum_{u \geq T+1} \mu(u) + \sum_{u \geq T+2} \mu(u) + \dots \right] + \rho(i, t)$$

<sup>2</sup> Notons d'ailleurs qu'on peut résoudre ce programme sans passer par la maximisation sous contrainte, en utilisant un algorithme simple : à la première période, on réalise successivement les investissements en commençant par le plus rentable ( $i=1$ ), puis le second plus rentable ( $i=2$ ), ainsi de suite, jusqu'à atteindre la contrainte de flux souhaitée ; puis on fait de même pour la période 2 avec les opérations qui restent, et ainsi de suite...

Là aussi, comme dans le cas de la contrainte de flux précédent, ces relations définissent, avec les données initiales, les valeurs des variables  $x(i,t)$  qui donnent la solution optimale. Cette solution optimale donne pour chaque projet sa date de réalisation. Par exemple, pour le projet  $i$ , sa date de réalisation  $\theta$  est telle que  $\rho(i,\theta)=0$  et pour cette date optimale, l'expression entre crochets est maximale et égale à  $\lambda(i)$ <sup>3</sup>.

Cette décision peut être obtenue par un processus de décentralisation. Pour cela définissons une VTC égale à :

$$VTC(t) = (1 + j)^t \sum_{u \geq t} \mu(u)$$

Notons que, tant que  $t$  est inférieur à  $T$ , les variables duales  $\mu(t)$  sont nulles et la relation précédente devient :

$$VTC(t) = (1 + j)^t \sum_{u \geq T} \mu(u)$$

On voit donc que, tant que le stock d'abattement n'est pas épuisé, la VTC croît comme le taux d'actualisation : on retrouve la formule de Hotelling. En revanche, lorsque le stock est épuisé, la VTC croît moins vite que la règle de Hotelling puisque :

$$VTC(T + 1) = (1 + j)^{T+1} \sum_{u \geq T+1} \mu(u) = (1 + j)[VTC(T) - (1 + j)^T \mu(T)] < (1 + j)VTC(T)$$

## 1.4. Comparaison des deux cas

Notons qu'on peut résoudre le programme avec contraintes sur les flux sans passer par la maximisation sous contrainte, en utilisant un algorithme simple : à la première période, on réalise successivement les investissements en commençant par le plus rentable ( $i=1$ ), puis le second plus rentable ( $i=2$ ), ainsi de suite, jusqu'à atteindre la contrainte de flux souhaitée ; puis on fait de même pour la période 2 avec les opérations qui restent, et ainsi de suite...

Il est également évident que dans les deux cas de contraintes, l'ordre dans lequel doivent être pris les investissements est le même : on commence par le moins cher, et ainsi de suite ; la différence entre ces deux cas réside dans le rythme annuel. Dans le cas de la contrainte par flux, le volume d'investissement annuel est d'abord déterminé directement par les contraintes, la VTC en résultant. Dans le cas de la contrainte par

---

<sup>3</sup> Notons d'ailleurs qu'on peut résoudre ce programme sans passer par la maximisation sous contrainte, en utilisant un algorithme simple : à la première période, on réalise successivement les investissements en commençant par le plus rentable ( $i=1$ ), puis le second plus rentable ( $i=2$ ), ainsi de suite, jusqu'à atteindre la contrainte de flux souhaitée ; puis on fait de même pour la période 2 avec les opérations qui restent, et ainsi de suite...

stock, on connaît l'évolution des prix tant que la contrainte n'est pas saturée : elle évolue selon la règle de Hotelling ; les investissements annuels en résultent.

## 2. Cas d'un opérateur à rendements décroissants par année

On suppose que chaque année intervient un opérateur dont la fonction de coût présente des rendements décroissants,  $C(t, a(t))$ , dont la dérivée première par rapport à  $a$  est positive, et la dérivée seconde aussi. Les relations (1), (2) et (3) sont les mêmes. Les variables sont les  $a(t)$ , le programme à optimiser est :

$$-\sum_t \frac{c(t, a(t))}{(1+j)^t}$$

Dans le cas de contrainte de stock, la contrainte s'écrit :

$$S(t) - S = B \sum_{\theta=1}^{\theta=t} Y(\theta) - \sum_{v=1}^{v=t} (t-v)a(t)$$

La maximisation du lagrangien donne :

### 2.1. Avec contraintes sur les flux

Si la contrainte s'exerce sur les flux, alors cette contrainte s'écrit :

$$E(t) - H(t) = BY(t) - \sum_{v=1}^{v=t} a(v) - H(t) \leq 0$$

La maximisation du lagrangien donne :

$$\frac{\partial c(t, a(t))}{\partial a} \frac{1}{(1+j)^t} = \sum_{u \geq t} \mu(u)$$

C'est la relation qui maximise :

$$-\sum_t \frac{c(t, a(t))}{(1+j)^t} + a(t) \left[ \sum_{u \geq T} \mu(u) \right]$$

qui est la VAN de l'opérateur agissant à l'année.

### 2.2. Avec contraintes sur les stocks

La maximisation du lagrangien donne :



$$\frac{\partial c(t, a(t))}{\frac{\partial a}{(1+j)^t}} = (T-t) \sum_{u \geq T} \mu(u) + \sum_{u \geq T+1} \mu(u) + \sum_{u \geq T+2} \mu(u) + \dots$$

C'est la relation qui maximise :

$$-\sum_t \frac{c(t, a(t))}{(1+j)^t} + a(t) \left[ (T-t) \sum_{u \geq T} \mu(u) + \sum_{u \geq T+1} \mu(u) + \sum_{u \geq T+2} \mu(u) + \dots \right]$$

qui est la VAN de l'opérateur agissant à l'année t.

### 2.3. Comparaison des deux cas

On voit facilement que les VTC ont les mêmes expressions que précédemment en fonction des variables duales. La décentralisation s'effectue comme précédemment également. On voit aussi que chaque opérateur pousse sa production jusqu'à ce que la tranche marginale de son investissement ait une rentabilité nulle. Mais bien sûr comme les autres tranches ont une rentabilité strictement positive, la rentabilité globale de son investissement est positive.

## 3. Extensions

On peut tenir compte d'une obsolescence des investissements en supposant que leur efficacité n'est plus constante et égale à 1, mais qu'elle décroît au rythme  $\delta$  par an : si l'investissement est mis en service en t, à l'année  $\theta$  il abat :  $(1-\delta)^{\theta-t}$ . Les formules sont un peu plus compliquées mais la nature des conclusions n'est pas changée.

Dans le cas des investissements d'abattement initial unitaire et d'une contrainte de flux, la relation 5 devient :

$$\lambda(i) = \left[ \sum_{v \geq t} \mu(v)(1-\delta)^{v-t} - \frac{c(i)}{(1+j)^t} \right] + \rho(i, t)$$

Et dans le cas d'une contrainte de stock, la relation 6 devient :

$$\lambda(i) = \left[ -\frac{c(i)}{(1+j)^t} + \left[ \sum_1^{T-t} (1-\delta)^v \right] \sum_{u \geq T} \mu(u) + (1-\delta)^{T-t+1} \sum_{u \geq T+1} \mu(u) + (1-\delta)^{T-t+2} \sum_{u \geq T+2} \mu(u) + \dots \right] + \rho(i, t)$$

Les expressions des VTC en fonction des variables duales sont les mêmes que précédemment.

On pourrait aussi prendre en compte un progrès technique régulier, aboutissant par exemple à augmenter la production d'un investissement selon un taux annuel constant. La formalisation serait la même que dans le cas d'obsolescence technique, avec cette fois un paramètre  $\delta$  qui serait négatif dans les formules précédentes.



## COMPLÉMENT 5

# RAPPELS SUR LE TAUX D'ACTUALISATION

---

Christian Gollier<sup>1</sup> et Alain Quinet<sup>2</sup>

Le taux d'actualisation<sup>3</sup> permet de ramener à une même date des flux monétaires intervenant à des périodes différentes, et donc d'arbitrer entre le présent et le futur. Un taux élevé donne un faible poids au futur, tandis qu'un taux faible lui donne plus d'importance et indique que l'on se préoccupe davantage des générations futures. Ainsi, un taux d'actualisation de 2 % signifie que la société accepte de dépenser 82 euros aujourd'hui pour obtenir 100 euros dans 10 ans, contre seulement 61 euros dans le cas où le taux d'actualisation est de 5 %. Plus généralement, si  $r$  est le taux d'actualisation,  $x$  euros dans  $n$  années correspondent à  $\frac{x}{(1+r)^n}$  euros aujourd'hui.

Le taux d'actualisation joue plusieurs rôles dans nos travaux :

- il constitue la référence pour l'actualisation des choix d'investissements publics ;
- il constitue aussi la référence pour déterminer une trajectoire de la valeur tutélaire du carbone conforme à une règle de Hotelling.

Cette annexe explicite comment se construit le taux d'actualisation socioéconomique de référence.

---

<sup>1</sup> Toulouse School of Economics, University of Toulouse-Capitole.

<sup>2</sup> Président de la commission sur la valeur de l'action pour le climat.

<sup>3</sup> Pour davantage de précisions sur le taux d'actualisation, il est nécessaire de se référer aux rapports Lebègue (2005), Gollier (2011) et Quinet É. (2013). Ces rapports ont précisé des règles d'usage. Voir Lebègue D. (2005), *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, Commissariat général du Plan ; Gollier G. (2011), *Le calcul du risque dans les investissements publics*, Centre d'analyse stratégique ; Quinet É. (2013), *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*, Commissariat général à la stratégie et à la prospective.

## 1. Pourquoi actualiser

### 1.1. Taux d'actualisation : préférence pour le présent et effet richesse

***La préférence pure pour le présent représente le taux auquel le bien-être (l'utilité) des générations futures est actualisé***

Celle-ci recouvre deux éléments :

- **lorsque l'on raisonne à l'échelle d'une génération, il est légitime de tenir compte d'une certaine impatience.** Cette impatience justifie une valeur de la préférence pure pour le présent comprise entre 0 % et 2 % (ce qui signifie que l'agent donne un poids relativement élevé au futur) ;
- lorsque l'on raisonne sur un horizon de temps supérieur à une génération, l'argument d'impatience perd de sa pertinence et la valorisation de la préférence pure pour le présent soulève des débats éthiques importants. L'équité entre générations plaide pour un taux de préférence pure égal à zéro.

#### ***L'effet richesse***

Il faut aussi prendre en compte le fait que les conditions de vie des générations futures seront meilleures que les nôtres, au moins en espérance. Avec un taux de croissance de l'économie de 1,5 % par an, la consommation sera 4,4 fois plus élevée dans 100 ans qu'aujourd'hui.

De plus, l'utilité apportée par un petit supplément de consommation (*l'utilité marginale*) est décroissante avec le niveau de consommation.

- Dans la mesure où la consommation est croissante dans le temps et l'utilité marginale décroissante, les ménages attribuent une plus grande valeur à 1 euro dépensé aujourd'hui qu'à 1 euro dépensé dans un an. Ils ont ainsi une préférence pour le lissage dans le temps de la consommation. En d'autres termes, la décroissance de l'utilité marginale traduit une aversion aux inégalités, intertemporelles ou intergénérationnelles.
- L'intensité de cette préférence est mesurée par l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation à la consommation.

Ainsi, en investissant dans l'avenir dans une économie en croissance, on appauvrit les générations présentes au profit des générations futures qui seront elles-mêmes relativement plus riches en raison de la croissance et donneront relativement moins de valeur à une unité de consommation supplémentaire. Cela augmente donc les inégalités intergénérationnelles et n'est compensé que si la rentabilité du projet est suffisante.

### La règle de Ramsey agrège ces deux effets

$$r_f = \rho + \eta g$$

- $r_f$  est le taux d'intérêt sans risque (*risk-free rate*) qui sert à actualiser un accroissement certain de la consommation future.
- $\rho$  mesure la préférence pure pour le présent.
- $g$  mesure le taux de croissance espéré du PIB/habitant. Plus la croissance anticipée de la consommation par tête est forte, plus les ménages seront réticents à renoncer à une consommation présente.
- $\eta$  mesure l'élasticité de l'utilité marginale de la consommation à la consommation, ou encore l'aversion de la collectivité aux inégalités. Dans une économie en croissance, plus l'intensité de cette préférence pour le lissage est élevée, plus les ménages exigeront un taux d'intérêt élevé pour substituer une consommation présente par une consommation future.
- $\eta g$  correspond donc à la croissance espérée par tête pondérée par un coefficient de déclin de l'utilité marginale avec la richesse.

Si on suppose que la croissance n'est plus déterministe mais subit des chocs aléatoires non corrélés, ce risque sur la croissance future incite à la constitution d'une épargne de précaution. Cela conduit à abaisser le taux sans risque issu de la formule de Ramsey car l'incertitude sur la croissance de la consommation justifie un effort supplémentaire ;  $\sigma^2$  représentant la variance du taux de croissance du PIB/habitant, plus cette variance est importante, plus l'incertitude est grande et plus le taux d'actualisation sans risque en est réduit.

$$r_f = \rho + \eta g - \underbrace{0.5\eta^2\sigma^2}_{\text{Effet de précaution}}$$

## 1.2. La prise en compte du risque des projets

Le calcul économique public doit prendre en compte les risques systématiques dont l'État ne peut se prémunir et pour lesquels il n'y a pas de mutualisation possible (par exemple, le risque de crise économique). Cela justifie le fait de favoriser mieux les projets dont les avantages sont moins corrélés avec la croissance économique (qui font

office d'assurance du risque collectif) par rapport à ceux dont les rendements dépendent fortement de la croissance.

$$r = r_f + \beta \phi$$

*Prime de risque*

- $\beta$  représente l'élasticité des bénéfices socioéconomiques propres au projet aux variations du PIB/hab. Il est spécifique au projet évalué.
  - $\beta$  représente l'élasticité des bénéfices du projet : il indique de combien augmentent en moyenne les bénéfices nets du projet (en pourcentage) lorsque le produit par habitant augmente de 1 %.
  - Dans le cas où les bénéfices et les coûts du projet sont indépendants du risque macroéconomique, c'est-à-dire de l'évolution générale de l'économie, alors le taux sans risque peut être utilisé dans le calcul socioéconomique ( $\beta = 0$  et  $r = r_f$ ).
  - Si  $\beta$  est positif, les bénéfices du projet augmentent quand la croissance augmente et se réduisent quand la croissance baisse, le projet augmente donc le risque macroéconomique à la marge. Par conséquent, la société doit exiger pour ce projet une rentabilité supérieure au taux sans risque pour qu'il soit considéré comme socialement désirable. C'est la raison pour laquelle le taux d'actualisation est augmenté d'une prime de risque positive ( $r > r_f$ ).
  - Si  $\beta$  est négatif, les bénéfices du projet augmentent lorsque la croissance diminue, ce qui soutient la croissance. Par conséquent, un tel projet d'investissement doit être favorisé car il a un bénéfice assurantiel. On peut accepter un taux de rentabilité espéré inférieur au taux sans risque pour ce type de projet, c'est-à-dire une prime de risque négative ( $r < r_f$ ).
- $\phi = \eta\sigma^2$  représente la prime de risque systématique, tandis que le coefficient  $\beta$  est relatif au projet à évaluer.

## 2. La détermination du taux d'actualisation des choix publics en France

### 2.1. Le choix des paramètres

Les rapports successifs du Commissariat général du Plan, du Centre d'analyse stratégique et de France Stratégie, dont le rapport Lebègue (2005) et le rapport Gollier (2017), ont permis de clarifier les principes de construction du taux d'actualisation public et ont proposé des éléments de calibrage. Le rapport Lebègue a retenu un taux de préférence pure pour le présent  $\rho = 1\%$ , une élasticité de l'utilité marginale de la consommation  $\eta = 2$  et une espérance du taux de croissance économique  $g = 1,5\%$ . Dans ce contexte, le taux d'actualisation pour les projets sans risque devait être :

$$r_f = 1\% + 2 * 1,5\% - 0\% = 4\%$$

Cependant, le rapport Gollier (2010) a souligné l'importance d'intégrer une prime de risque dans le calcul du taux d'actualisation, ce qui a mené à la révision du taux d'actualisation sans risque dans le rapport Quinet (2013) afin de le rendre compatible avec la valeur de la prime de risque utilisée dans le calcul. Par ailleurs, l'effet de précaution étant faible à court terme, il a été jugé pertinent de différencier un taux d'actualisation de court terme et un taux de long terme.

Le taux sans risque et la prime de risque ont ainsi été déterminés conjointement :

- le taux sans risque de 4 % a été abaissé à 2,5 %, afin de prendre en compte notamment la dégradation des perspectives de croissance par rapport au contexte dans lequel raisonnait le rapport Lebègue et les taux d'intérêt très faibles renvoyés par les marchés ;
- le taux sans risque décroît dans le temps pour tenir compte des incertitudes sur la croissance. Il est ainsi fixé à 1,5 % dans le long terme, c'est-à-dire au-delà de 70 ans ;
- la prime de risque systématique a été fixée à 2 % (3 % au-delà de 70 ans).

Ainsi, à court-moyen terme,

$$r = 2,5\% + 2\% * \beta$$

Et à long terme :

$$r = 1,5\% + 3\% * \beta$$

Le rapport aboutit ainsi à un taux d'actualisation – avec prime de risque – de 4,5 % si  $\beta = 1$  (mais celui-ci peut varier par grande catégorie de projets, voire en fonction du

projet). C'est ce taux d'actualisation qui est en vigueur pour l'évaluation socio-économique des investissements publics en France.

## **2.2. La corrélation entre risque économique et risque climatique (le bêta climatique ou bêta carbone)**

Concernant le risque climatique, une des sources du débat sur le taux d'actualisation à utiliser vient de la nature intrinsèquement incertaine des bénéfices de la lutte contre le changement climatique. C'est pourquoi les économistes se sont intéressés à déterminer un « bêta climatique », afin d'évaluer quelle est la prime de risque à considérer dans les calculs de rentabilité des investissements participant à la lutte contre le changement climatique. La question sous-jacente est la suivante : lutter contre le changement climatique réduit-il le risque global porté par les générations futures ? En d'autres termes, les dommages climatiques (et donc les bénéfices des investissements verts) sont-ils négativement corrélés avec la croissance économique future ?

On peut au préalable prendre en compte deux canaux de transmissions, donnant des corrélations de signes opposés :

- canal économique : si la croissance est faible, les émissions sont faibles, et les dommages climatiques seront faibles. À l'inverse, si la croissance est forte, les émissions sont fortes et les dommages climatiques seront élevés ;
- canal climatique : si la sensibilité du climat au CO<sub>2</sub> est plus forte qu'anticipé, les dommages climatiques seront élevés. Si la sensibilité du climat au CO<sub>2</sub> est moins forte qu'anticipé, les dommages climatiques seront faibles et le PIB peu affecté.

La valeur du bêta dépend alors de la nature de l'incertitude :

- si l'incertitude principale porte sur le rythme du progrès technique à faibles émissions – qui détermine la croissance économique –, le bêta est positif, c'est-à-dire qu'il faut ajouter une prime de risque positive au taux d'actualisation sans risque pour calculer la valeur actualisée des dommages climatiques marginaux générés par l'émission d'une tonne de CO<sub>2</sub> aujourd'hui, c'est-à-dire le coût social du carbone. En effet, si la croissance est faible, les émissions seront faibles, de même que les bénéfices de la lutte contre le changement climatique. Au contraire, plus de progrès technique, donc plus de croissance et de consommation, mèneront à un accroissement des émissions et du dérèglement climatique et, par conséquent, à un bénéfice marginal de la lutte contre le changement climatique plus important. Par exemple, les bénéfices de la construction d'une digue aux Pays-Bas seront d'autant plus importants que la richesse des villes qu'elle protège est grande. La corrélation entre consommation et bénéfices de la lutte contre le changement climatique serait donc positive, d'où un bêta climatique positif lui aussi ;



- si l'incertitude principale sur la croissance porte sur l'ampleur des dommages causés par le changement climatique, le bêta climatique est négatif. En effet, s'il existe des risques pour que le dérèglement climatique soit fortement nuisible à la croissance, alors il est nécessaire de favoriser les projets qui luttent contre ce dérèglement afin de soutenir la croissance économique. La baisse de la consommation due au changement climatique augmenterait donc les bénéfices de l'action climatique (corrélation négative). Un bêta climatique négatif aura pour effet de réduire le taux d'actualisation et mènera à valoriser davantage les investissements à faibles émissions de GES.

Lors de la réévaluation du taux d'actualisation effectuée par la commission É. Quinet (2013), celle-ci a retenu à titre conservatoire un bêta d'une valeur de 1 pour le carbone. Le débat concernant le signe du bêta climatique n'est pas tranché : Sandsmark et Vennemo (2007)<sup>4</sup> ou Daniel *et al.* (2015)<sup>5</sup> estiment qu'il est négatif, mais ils ne tiennent compte que du canal climatique dans leur analyse (pas d'incertitude sur la croissance économique). Par contre, Dietz, Gollier et Kessler (2018)<sup>6</sup>, qui intègrent les deux canaux mentionnés plus haut et plusieurs autres sources d'incertitude, trouvent que le bêta climatique devrait être positif dans les modèles intégrés climat-énergie comme le modèle DICE de Nordhaus.

---

<sup>4</sup> Sandsmark M. et Vennemo H. (2007), « A portfolio approach to climate investments: CAPM and endogenous risk », *Environmental and Resource Economics*, vol. 37(4), p. 681-695.

<sup>5</sup> Daniel K., Litterman R. et Wagner G. (2015), « Applying asset pricing theory to calibrate the price of climate risk », Columbia Business School.

<sup>6</sup> Dietz S., Gollier C. et Kessler L. (2018), « The climate beta », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 87, janvier, p. 258-274.





## COMPLÉMENT 6

# LES AVANCÉES RÉCENTES DE LA RECHERCHE EN ÉCONOMIE DU CLIMAT

---

Aude Pommeret<sup>1</sup>

L'économie du changement climatique a suscité de nombreuses controverses et soulevé des questions de politique économique de premier plan, dont l'analyse économique s'est ensuite emparée. On peut distinguer quatre grands axes structurant les avancées de la recherche en la matière : la meilleure appréhension des coûts et bénéfices de la politique de lutte contre le changement climatique ; la coordination internationale ; la meilleure prise en compte des phénomènes physiques ; enfin, la mise en évidence et le traitement des potentiels effets pervers de la politique environnementale.

### 1. Meilleure appréhension des coûts et bénéfices de la politique environnementale

Une première avancée importante relative aux coûts concerne la prise en compte du progrès technique avec des approches multisectorielles de l'innovation et du « progrès technique dirigé ». En effet, il est manifeste que les prix relatifs des énergies affectent significativement le type de technologies qui est développé et adopté<sup>2</sup>. Les analyses coûts-bénéfices des politiques environnementales devraient donc intégrer la réponse endogène du progrès technique aux différentes politiques envisagées. Ainsi Acemoglu *et al.* (2012)<sup>3</sup> introduit un tel progrès technique dans un modèle de croissance avec contrainte environnementale, où le bien final requiert des inputs de deux secteurs dont

---

<sup>1</sup> Département Développement durable et numérique, France Stratégie.

<sup>2</sup> Popp D. (2002), « Induced innovation and energy prices », *American Economic Review*, 92, p. 160-180.

<sup>3</sup> Acemoglu D., Aghion P., Bursztyn L. et Hemous D. (2012), « The environment and directed technical change », *American Economic Review*, 102(1), p. 131-166.

l'un utilise du capital polluant. La R & D peut être dirigée vers l'un ou l'autre de ces deux secteurs. Cet article montre que si les inputs sont suffisamment substituables, la croissance de long terme peut être soutenue dès lors que l'innovation et la production « sales » sont temporairement taxées et que l'innovation « propre » est temporairement subventionnée. *In fine*, la prise en compte de la réaction endogène du progrès technique à la politique environnementale conduit à des scénarios plus optimistes que lorsque le progrès technique reste exogène mais plaide cependant pour la politique environnementale la plus immédiate possible, afin que soit raccourcie une phase de transition avec croissance ralentie.

Toujours dans une perspective de meilleure prise en compte des avancées technologiques et de meilleure appréhension des coûts, certaines approches ont cherché à intégrer les nouvelles technologies hypothétiques – c'est-à-dire encore non développées –, tels le captage et le stockage du carbone (CSC). En effet, le large potentiel du CSC a été souligné par le GIEC<sup>4</sup>, l'Union européenne<sup>5</sup> et l'Agence de protection environnementale américaine<sup>6</sup>. L'intérêt de considérer cette technologie alors même qu'elle n'est pas encore largement développée réside dans l'alternative qu'elle propose aux énergies renouvelables perçues comme coûteuses, pour lutter contre le changement climatique. Les articles partent alors de l'hypothèse que cette technologie est disponible et étudient son déploiement optimal. Certaines approches prennent en compte les limites géologiques qui existent pour la capacité de stockage,<sup>7</sup> d'autres insistent sur les interactions entre le CO<sub>2</sub> déjà présent dans l'atmosphère, les quantités d'énergie fossile encore disponibles et le CSC<sup>8</sup> ; d'autres enfin distinguent les secteurs à l'origine des émissions et reconnaissent que le CSC est plus attractif pour certains – comme la production d'électricité – que d'autres, le transport par exemple. Un résultat important de cette littérature (voir Moreaux et Withagen, 2015<sup>9</sup>) est qu'en présence d'une fonction de dommage, il ne faut pas attendre que le budget carbone soit épuisé pour utiliser le CSC (à supposer que la technologie soit bel et bien disponible avant).

---

<sup>4</sup> Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M. et Meyer L. (2005), *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*, Cambridge University Press, New York.

<sup>5</sup> European Union (2014), « [Climate Action. A low-carbon economy boosts economic growth and creates jobs](#) ». Luxembourg, Office des publications de l'Union européenne, novembre.

<sup>6</sup> Folger P. (2014), « Carbon capture and sequestration: Research, development, and demonstration at the U.S. Department of Energy », Congressional Research Service, US.

<sup>7</sup> Lafforgues G., Magné B. et Moreaux M. (2008), « Optimal sequestration policy with a ceiling on the stock of carbon in the atmosphere », in R. Guesnerie et H. Tulkens (eds.), *The Design of Climate Policy*, MIT Press, Cambridge, p. 273-304 ; Ayong Le Kama A., Fodha M. et Lafforgue G. (2013), « Optimal carbon capture and storage policies », *Environmental Modeling and Assessment*, p. 418-426.

<sup>8</sup> L'optimalité du développement du CSC dépend de façon cruciale de l'énergie fossile encore disponible, compte tenu de la concentration de CO<sub>2</sub> déjà présente dans l'atmosphère. Voir Moreaux M. et Withagen C. (2015), « Optimal abatement of carbon emission flows », *Journal of Environmental Economics and Management*, 74C, p. 55-70.

<sup>9</sup> *Ibidem*.

Toujours du côté des coûts de la politique environnementale, il a été montré par Vogt Schilb et Hallegatte (2018) que les courbes de coût d'abattement marginal (« MAC curves ») devaient être interprétées avec soin. Il peut en effet être optimal de ne pas réaliser les investissements d'atténuation dans l'ordre croissant de leurs coûts marginaux mais bien d'exercer tôt des options de réduction d'émissions plus coûteuses, car certains investissements ne peuvent pas être déployés de manière instantanée et doivent par conséquent être anticipés. Leur modèle intègre cette caractéristique via des coûts d'ajustement qui prennent en compte le coût d'opportunité croissant de l'utilisation des ressources rares (telles que les travailleurs qualifiés et le capital approprié) nécessaires à l'investissement d'abattement. Ainsi, il sera beaucoup plus cher d'isoler tous les bâtiments d'un pays en trois mois qu'en trente ans. Cette approche leur permet de distinguer entre la valeur du carbone et le coût marginal de l'investissement d'abattement, et montre que les dépenses d'abattement de court terme doivent être supérieures à ce que suggère le prix du carbone et dirigées vers les secteurs les plus difficiles à décarboner. Cela permet donc de concilier une valeur carbone croissante et un investissement d'abattement immédiatement fort (la trajectoire optimale d'investissement dans le temps peut même être décroissante).

Du côté des bénéfices de la politique environnementale, l'analyse économique s'est attachée à mieux prendre en compte les incertitudes – surtout celles qui frappent les dommages environnementaux<sup>10</sup> – dans les modèles d'évaluation intégrée, notamment dans les travaux de Christian Traeger<sup>11</sup>. L'objectif est bien de pouvoir formuler des politiques de lutte contre le changement climatique pertinentes en l'absence d'une information précise, en particulier sur les bénéfices de telles politiques. Prendre en compte toutes les potentielles réalisations des dommages du changement climatique dans un modèle d'évaluation intégrée se heurte techniquement à « la malédiction de la dimensionnalité » qui détériore le temps de résolution comme la qualité des approximations des fonctions de politiques et implique donc de simplifier au maximum le reste de la modélisation. Ainsi des simplifications doivent être opérées en matière d'états potentiels considérés, de représentation du cycle du carbone ou des délais de réaction des températures. Considérer l'incertitude implique aussi de prendre en compte les comportements des agents vis-à-vis du risque : ces derniers doivent être distingués du comportement vis-à-vis de la substitution intertemporelle grâce à des fonctions d'utilité à

---

<sup>10</sup> On rappelle qu'une partie de ces dommages présente un caractère marchand – perte potentielle de PIB en raison de la limitation des ressources naturelles et de la perte de capital productif en cas de catastrophe. Mais une autre partie, non marchande et encore plus difficile à valoriser, concerne la perte de biodiversité et les risques de destruction de sociétés et d'écosystèmes.

<sup>11</sup> Voir Traeger C. (2014), « A 4-States DICE: Quantitatively addressing uncertainty effects in climate change », *Environmental and Resource Economics*, 59(1), p. 1-37.

la Epstein-Zin<sup>12</sup>. De tels modèles, nourris avec les scénarios d'émissions utilisés dans les quatrième et cinquième rapports du GIEC, permettent alors de reproduire des réponses des températures qui s'approchent davantage de celles des gros modèles climatiques (MAGICC<sup>13</sup>) que les modèles déterministes comme DICE<sup>14</sup>.

## 2. Des avancées concernant la coordination internationale des politiques environnementales

Pour traiter le problème global du réchauffement climatique, l'importance de la mise en place d'accords internationaux, qui ont pour le moment culminé au moment de la COP21 de Paris, a été reconnue d'un point de vue académique. Les travaux ont notamment cherché à modéliser les négociations internationales, auxquelles on ne peut appliquer la théorie de la négociation standard. Par exemple, les accords de Paris se sont déroulés de la façon suivante : chaque partie quantifie sa propre contribution (à l'effort de réduction du changement climatique) avant que l'ensemble des engagements soient acceptés, ce qui est qualifié d'approche « bottom-up » et a été fortement critiqué par certains économistes<sup>15</sup>. Cela contraste fortement avec le fonctionnement des négociations de Kyoto (1997) lors desquelles une approche « top-down » avait été adoptée pour inciter les gouvernements à réduire les émissions de 5 % par rapport aux niveaux de 1990. Harstad<sup>16</sup> utilise le concept de jeu dynamique avec participation endogène, où les parties peuvent à la fois choisir leur contribution et investir dans leur capacité future à contribuer. Cela lui permet de déterminer la procédure de négociation qui incite le mieux à la participation et d'expliquer l'évolution des caractéristiques des accords atteints entre Kyoto (1997) et Paris (2015). En particulier, il montre que la participation endogène justifie que les négociations soient passées d'accords contraignant fortement un nombre limité de pays à ceux engageant de façon limitée un grand nombre de pays. Hoel (1992)<sup>17</sup> avait déjà montré qu'imposer à toutes les parties une réduction des émissions d'un pourcentage donné décourageait la participation aux négociations. La nécessité d'une forte participation aux accords internationaux a aussi été mise en évidence par Hoel (1991)<sup>18</sup> ou Eichner et Pethig (2011)<sup>19</sup>. Il est souvent

---

<sup>12</sup> Epstein L. et Zin S. (1989), « Substitution, risk aversion, and the temporal behavior of consumption and asset returns: A theoretical framework », *Econometrica*, 57(4), p. 937-969.

<sup>13</sup> IPCC (2013), *Projections of Global and Regional Climate Change*, chapitre 5.

<sup>14</sup> Nordhaus W. (2017), « Evolution of assessments of the economics of global warming: changes in the DICE model 1997-2017 », NBER WP 23319.

<sup>15</sup> Gollier C. et Tirole J. (2015), « [Making climate agreements works](#) », *The Economist* guest blog, 1<sup>er</sup> juin,

<sup>16</sup> Harstad, B. (2018), [Pledge-and-review bargaining](#), mimeo,

<sup>17</sup> Hoel M. (1992), « International environmental conventions: the case of uniform reductions of emissions », *Environmental and Resource Economics*, 2, p. 141-159.

<sup>18</sup> Hoel M. (1991), « Global environmental problems: The effects of unilateral actions taken by one country », *Journal of Environmental Economics and Management*, 20, p. 55-70.

avancé que malgré le caractère global du problème des émissions de GES, les actions unilatérales apportent une contribution dans la bonne direction et montrent l'exemple. Pourtant, ces travaux montrent que lorsque les politiques de réduction des émissions sont adoptées unilatéralement ou par un sous-groupe de pays, cela peut avoir une incidence sur le résultat des négociations internationales et finalement conduire à des émissions globales plus élevées. Enfin, une fois les accords établis, on peut s'interroger sur la stabilité des coalitions formées. Benchekroun et Chaudhuri (2014)<sup>20</sup> montrent que l'adoption d'une technologie propre, en modifiant le rapport de forces, peut déstabiliser une coalition existante, et entraîner des émissions globales plus fortes. Ce résultat a d'autant plus de risques d'apparaître que le stock de pollution est déjà élevé. L'enseignement à en tirer est que les technologies propres ne sont pas la panacée, puisqu'elles peuvent mettre en péril des accords internationaux. Un moyen d'éviter cela serait de renforcer les transferts entre les parties pour que soient tout de même atteints ces accords (voir Germain *et al.*, 2003<sup>21</sup>).

La recherche a aussi cherché à évaluer l'urgence de la mise en place d'accords d'envergure et définitifs. Beccherle et Tirole (2011) obtiennent que retarder les engagements (comme l'ont fait les protocoles de Kyoto et de Copenhague) conduit à des émissions plus élevées, une fois que la négociation a finalement eu lieu, et Açıkgöz et Benchekroun (2015)<sup>22</sup> montrent que l'anticipation d'accords internationaux – qui est aussi une forme de retardement des accords – a un effet ambigu sur les émissions courantes, qui dépend de la proximité de la cible avec les émissions *business-as-usual*. Harstad (2015)<sup>23</sup> montre même que des accords internationaux, lorsqu'ils ont une durée finie et se succèdent donc dans le temps, peuvent résulter en un bien-être inférieur à celui qui prévaut en l'absence d'accords internationaux car les pays, anticipant les négociations futures, se trouvent confrontés à un problème de « hold-up » (risque d'accroître le pouvoir de négociation de la partie adverse) ce qui réduit leurs incitations à investir dans la technologie propre.

Enfin, la pertinence d'un prix unique du carbone dans le monde<sup>24</sup> a animé les débats autour de Jean Tirole, avec l'appel « Pour un accord climatique ambitieux et crédible à

---

<sup>19</sup> Eichner, T. et Pethig R. (2011), « Carbon leakage, the green paradox, and perfect future markets », *International Economic Review*, vol. 52(3), p. 767-805, 08.

<sup>20</sup> Benchekroun H. et Chaudhuri A. (2014), « Cleaner technologies and the stability of international environmental agreements », *Journal of Public Economic Theory*, Volume 17, Issue 6.

<sup>21</sup> Germain M., Toint P., Tulkens H. et De Zeeuw A. (2003), « Transfers to sustain dynamic core-theoretic cooperation in international stock pollutant control », *Journal of Economic Dynamics and Control*, 28, p. 79-99.

<sup>22</sup> Açıkgöz Ö. T. et Benchekroun H. (2017), « Anticipated international environmental agreements », *European Economic Review*, 92, p. 306-336.

<sup>23</sup> Harstad B. (2016), « The dynamics of climate agreements », *Journal of the European Economic Association*, 14(3), p. 719-752.

<sup>24</sup> 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.

Paris », qui a précédé la COP21<sup>25</sup> et préconisé un signal-prix de la politique environnementale identique dans tous les pays du monde. Un tel signal-prix est économiquement souhaitable dans une économie de premier rang où tous les facteurs sont mobiles entre pays, et dès lors que des transferts entre pays sont réalisés, mais politiquement difficile dans la mesure où de tels transferts sont compliqués à mettre en place, ainsi que le remarque le rapport Stern-Stiglitz.

### 3. Une meilleure prise en compte des phénomènes physiques

Les incertitudes relevées par les sciences du climat se sont réduites. Il est notamment devenu clair qu'en plus des dommages qui augmentent graduellement avec le réchauffement climatique, il existe des niveaux de températures (points de basculement ou « tipping points ») au-delà desquels des catastrophes irréversibles vont se produire. Les exemples souvent proposés sont la modification des courants marins (circulation méridienne de retournement de l'Atlantique), le dépérissement des forêts amazoniennes, la fonte du permafrost avec libération de méthane, etc. Lorsqu'il est connu, le seuil de température incite à une épargne de précaution<sup>26</sup>. La stratégie consiste en effet à ajuster l'épargne et l'accumulation du capital afin d'atténuer les effets de la catastrophe. Lorsque le seuil est incertain (avec un taux de hasard nul pour les températures dont on a déjà pu observer qu'elles ne déclenchaient pas la catastrophe), il conduit à peu d'effet sur l'épargne de précaution (qui permet de lisser la consommation et concerne aussi l'investissement « sale ») mais à une forte augmentation de la valeur sociale du carbone (qui incite à l'investissement « vert »)<sup>27</sup>, afin d'enrayer le réchauffement climatique et de réduire l'imminence de la catastrophe. Dans le cas où les effets de la catastrophe ne se font sentir que des décennies voire des siècles plus tard, le coût social du carbone peut se retrouver multiplié par deux<sup>28</sup>. Van der Ploeg et de Zeeuw (2018)<sup>29</sup> étudie les interactions entre l'épargne de précaution et le coût social du carbone et distingue la partie du prix du carbone qui provient des dommages marginaux de celle qui a pour origine le risque d'atteindre le seuil irréversible.

Il a aussi été reconnu qu'il était impossible d'éviter tout réchauffement climatique et qu'il était nécessaire de s'intéresser aux coûts et bénéfices de l'adaptation<sup>30</sup>, celle-ci étant

---

<sup>25</sup> Voir la [TSE-CEC Joint Initiative](#).

<sup>26</sup> Keller K., Bolker B. et Bradford D. (2004), « Uncertain climate thresholds and optimal economic growth », *Journal of Environmental Economics and Management*, 48, p. 723-741.

<sup>27</sup> Lemoine D. et Traeger C. (2014), « Watch your step: optimal policy in a tipping climate », *American Economic Journal: Economic Policy*, 6, p. 137-166.

<sup>28</sup> Lontzek T., Cai Y., Judd K. et Lenton T. (2015), « Stochastic integrated assessment of climate tipping points indicates the need for strict policy », *Nature Climate Change*, 117, p. 585-597.

<sup>29</sup> Voir van der Ploeg R. et de Zeeuw A. (2018), « Climate tipping and economic growth: precautionary capital and the price of carbone », *Journal of the European Economic Association*, 16(5), p. 1577-1617.

<sup>30</sup> Voir IPCC (2014), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.



devenue inévitable. Pourtant, l'adaptation a longtemps été politiquement incorrecte, puisqu'elle signifiait d'une part l'échec de l'atténuation et que, d'autre part, elle risquait d'être interprétée comme une suggestion à réduire les efforts d'atténuation. Des articles de recherche étudient ainsi le mix optimal d'atténuation et d'adaptation. Une question principale concerne la sensibilité de ce mix optimal au niveau de développement des pays. Dans le cadre d'un jeu non coopératif, Buob et Stefan (2010)<sup>31</sup> avance que les pays les plus riches doivent investir dans les deux politiques tandis que les pays plus pauvres devraient favoriser l'atténuation, dans la mesure où ils n'auraient pas les moyens de réagir aux conséquences du changement climatique. Cependant, Tol (2005)<sup>32</sup> insiste sur les différences entre l'adaptation et l'atténuation, qui rendent ces politiques non parfaitement substituables dans la lutte contre les effets du changement climatique et suggèrent de ne pas nécessairement définir conjointement ces politiques. Ainsi, l'adaptation est réalisée et gérée en général au niveau local, et les gouvernements ou les organisations internationales ne doivent pas s'en mêler, au contraire de l'atténuation. Enfin les deux politiques se disputent les ressources pour leur financement, et contrairement à Buob et Stefan, Tol conclut qu'il vaut sans doute mieux, dans les pays pauvres, financer l'adaptation (notamment les politiques de santé) plutôt que l'atténuation.

#### 4. Mise en évidence et traitement de potentiels effets pervers de la politique environnementale

Au niveau macroéconomique, le « paradoxe vert »<sup>33</sup> initialement identifié par Hans-Werner Sinn indique que certaines politiques climatiques destinées à diminuer les émissions de carbone (telles une taxe carbone ou des subventions à l'énergie renouvelable), pourraient au contraire si elles sont introduites de façon progressive, conduire à l'augmentation de ces émissions et donc à accélérer le réchauffement climatique. En effet, les détenteurs d'énergies fossiles sont incités à accroître l'offre de leurs ressources puisqu'ils anticipent une réduction de la demande dans le futur et cela engendre une accélération du changement climatique. La nouveauté de ce raisonnement est qu'il intègre le côté offre du marché des énergies fossiles.

Le « paradoxe vert » est dit *faible* lorsque les émissions courantes augmentent suite à la politique climatique et *forte* lorsque la valeur actualisée des dommages climatiques augmente aussi. Les chercheurs ont déterminé les conditions d'apparition de l'un ou

---

<sup>31</sup> Buob S. et Stefan G. (2011), « To mitigate or to adapt: how to combat with global climate change », *European Journal of Political Economy*, 27(1), p. 1-16.

<sup>32</sup> Tol R. (2005), « Adaptation and mitigation: trade-offs in substance and methods », *Environmental Science and Policy*, 8(6), p. 572-578.

<sup>33</sup> Voir le numéro spécial de la *Review of Environmental Economics and Policy*, Volume 9, Issue 2, juillet 2015.

l'autre de ces paradoxes. De façon générale, la taille du paradoxe vert faible dépend des valeurs relatives des élasticités prix de la demande et de l'offre d'énergie fossile (voir van der Ploeg, 2016<sup>34</sup>), et l'apparition d'un paradoxe vert fort nécessite que la première soit supérieure (en valeur absolue) à la seconde. Cependant, lorsque les coûts d'extraction dépendent de la quantité extraite cumulée, la politique climatique peut conduire à laisser dans le sol davantage d'énergie fossile, ce qui empêche l'apparition du paradoxe vert fort (voir van der Ploeg et Withagen, 2012<sup>35</sup>).

L'existence d'un paradoxe vert est dangereuse dans le sens où elle apporte un argument contre la mise en place de politiques climatiques déjà bien compliquée. C'est probablement pour cette raison que la recherche académique, une fois ce paradoxe bien caractérisé, a principalement cherché à identifier les situations dans lesquelles il est affaibli ou inexistant. Ainsi, il existe des effets d'équilibre général qui peuvent aussi venir contrer le paradoxe vert (voir Eichner et Pethig, 2011<sup>36</sup>). L'exploitation anticipée des énergies fossiles augmente la production courante au détriment de la production future, ce qui contribue à accroître l'épargne globale et réduire les taux d'intérêt. Or, des taux d'intérêt plus faibles conduisent, selon la règle de Hotelling, à retarder l'extraction des énergies fossiles : cet effet joue bien en sens inverse du paradoxe vert et vient donc le limiter. D'autres caractéristiques sont de nature à atténuer le paradoxe vert pour des raisons assez complexes : la substituabilité entre énergie renouvelable et énergie fossile, leur utilisation concomitante, l'existence d'une technologie « backstop sale » qui contribue au réchauffement climatique, etc. (voir van Meijden *et al.*, 2017<sup>37</sup>).

Au niveau microéconomique se pose la problématique des biens irrécupérables (*stranded assets*). Tout d'abord, il existe davantage d'énergie fossile cotée sur les marchés qu'il est possible d'en brûler pour ne pas dépasser un réchauffement climatique de 2 °C. Cependant, les marchés financiers n'intègrent pas pour le moment dans les prix la possibilité que les gouvernements restreignent effectivement l'extraction pour limiter la hausse des températures à 2 °C (voir Carbon Tracker et Grantham Research Institute, 2013<sup>38</sup>). Au contraire, la littérature académique a pris en compte les interactions entre ces « stranded assets », le prix du carbone, la croissance économique ou la technologie des énergies renouvelables pour définir des politiques climatiques optimales. Par exemple, un taux d'actualisation plus faible, un taux d'assimilation naturelle du carbone

---

<sup>34</sup> Van der Ploeg F. (2016b), « Second-best carbon taxation in the global economy: the green paradox and carbon leakage revisited », *Journal of Environmental Economics and Management*, 78, p. 85-105.

<sup>35</sup> Van der Ploeg F. et Withagen C. (2012a), « Is there really a green paradox? », *Journal of Environmental Economics and Management*, 64(2012a), p. 342-363.

<sup>36</sup> Eichner T. et Pethig R. (2011), « Carbon leakage, the green paradox, and perfect future markets », *International Economic Review*, 52(08):767–805

<sup>37</sup> Van der Meijden G., van der Ploeg F. et Withagen C. (2017), « [Frontiers of Climate Change](#) », *Environmental and Resource Economics*, 68: 1.

<sup>38</sup> Carbon Tracker & Grantham Research Institute (2013), *Unburnable carbon 2013: wasted capital and stranded assets*, London: Grantham Research Institute.

plus faible ou un temps de réaction des températures plus court accroît le prix du carbone et accélère l'adoption des énergies renouvelables, ce qui conduit à un stock plus important d'énergie fossile irrécupérable. Ce dernier doit être pris en compte lors du calcul des coûts d'atténuation et affecte donc la politique environnementale optimale (voir van der Ploeg et Rezai, 2018<sup>39</sup>).

C'est aussi le cas des biens capitaux utilisés pour extraire l'énergie fossile ou nécessitant beaucoup d'énergie fossile pour fonctionner, qui voient leur déclassement accéléré lorsque la politique climatique est mise en place. De nouveau, le coût de l'atténuation doit intégrer non seulement le coût additionnel d'acquisition du capital propre (*i.e.* qui n'implique pas l'utilisation d'énergie fossile) plutôt que standard (*i.e.* qui requiert l'utilisation d'énergie fossile), mais aussi le coût de la transition vers ce capital propre lié à l'irréversibilité du capital standard déjà en place. Ainsi, Rozenberg *et al.* (2014)<sup>40</sup> montre que la prise en compte de ces coûts irrécupérables ou « échoués » modifie le choix des instruments de la politique climatique. Avec un prix du carbone, le coût de la transition provient de la sous-utilisation du capital standard qui perd alors en valeur et engendre une perte de revenu. Au contraire, des instruments tels que les subventions ou les normes environnementales, en redirigeant l'investissement, vont permettre d'éviter la sous-utilisation du capital standard et donc les coûts échoués, mais vont réduire les émissions plus lentement. Les auteurs montrent alors que dans ces conditions, le prix du carbone reste l'instrument le plus efficace au sens où il maximise le bien-être, mais le moins acceptable politiquement.

---

<sup>39</sup> Voir van Der Ploeg R. et Rezai A. (2018), « The simple arithmetic of carbon pricing and stranded assets », *Energy Efficiency*, mars, Volume 11, Issue 3, p. 627-639.

<sup>40</sup> Rozenberg J., Vogt-Schilb A. et Hallegatte S. (2014), « Transition to clean capital, irreversible investment and stranded assets », *Policy Research Working Paper*, Series 6859, The World Bank.





## DEUXIÈME PARTIE

# MODÉLISATION EMPIRIQUE

---





## COMPLÉMENT 7

# LE MODÈLE TIMES-FR

---

Ariane Millot<sup>1</sup> et Nadia Maïzi<sup>1</sup>

### 1. Description générale

Les modèles (ou plus exactement générateurs de modèles) TIMES<sup>2</sup> constituent une famille de modèles bottom-up qui permettent de réaliser des exercices de prospective long terme du système énergétique. Ils sont développés dans le cadre du programme ETSAP (*Energy Technology Systems Analysis Programme*) de l'AIE depuis les années 1980 qui regroupe une large communauté dans le monde, environ 300 institutions réparties dans plus de 80 pays. Ces modèles du système énergétique se déclinent à différentes échelles (mondiale, nationale ou locale) et comprennent un ou plusieurs secteurs suivant les données renseignées par l'utilisateur.

Le modèle TIMES-FR est le modèle France développé au sein du Centre de mathématiques appliquées des Mines ParisTech. Initié pour le secteur électrique (Assoumou, 2006), il a été déployé à l'ensemble du secteur énergétique.

### 2. Un modèle intégré du système énergétique

Les modèles TIMES proposent une représentation détaillée et désagrégée de l'offre technologique : les liens entre l'ensemble des technologies via les différents vecteurs énergétiques sont explicitement représentés et forment le système énergétique de référence (RES pour *Reference Energy System*) comme on peut le voir dans la Figure 1 représentant le modèle TIMES-FR. Les technologies sont différenciées suivant les

---

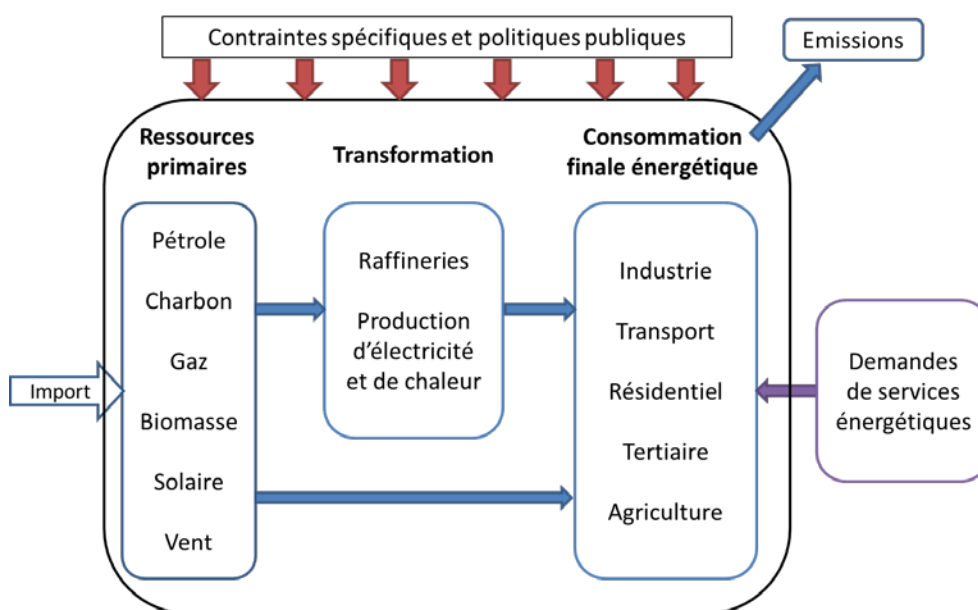
<sup>1</sup> Centre de mathématiques appliquées, Mines ParisTech, université PSL.

<sup>2</sup> TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) est en fait issu de deux anciens paradigmes de modèle Markal et EFOM. Voir Loulou R. *et al.* (2016) pour plus de détails.

secteurs qui vont de l'amont (ressources d'énergies primaires) à l'aval (secteurs consommant l'énergie finale) en passant par les technologies de transformation d'énergie. Pour chacune des technologies, les caractéristiques techniques et les coûts sont précisés comme le rendement, la durée de vie, le coût d'investissement et de fonctionnement ou encore le facteur de disponibilité. Chaque technologie des secteurs consommant l'énergie finale permet par ailleurs de satisfaire une demande de services énergétiques<sup>3</sup>. TIMES est donc un modèle technologique qui comprend une représentation riche et détaillée des technologies actuelles et futures pour chaque secteur du système énergétique.

Le système énergétique du modèle TIMES-FR comprend d'une part les secteurs de transformation de l'énergie : raffineries, cokeries, production d'électricité et de chaleur et d'autre part les secteurs de consommation de l'énergie finale : industrie, résidentiel-tertiaire, transport et agriculture. Les énergies fossiles (gaz naturel et charbon) qui n'ont pas besoin d'être transformées proviennent directement des importations, tandis que les énergies renouvelables (EnR) comme la biomasse sont spécifiées suivant leurs gisements potentiels (ou ressources disponibles).

**Figure 1 – Système énergétique de référence de TIMES-FR**



<sup>3</sup> Le modèle distingue la demande d'énergie finale et la demande de services énergétiques, par exemple consommation de pétrole dans les voitures et mobilité de passagers en voiture.



Dans le modèle TIMES-FR, les demandes de services énergétiques qui doivent être satisfaites sont présentées dans le Tableau 1. Le secteur de l'industrie est désagrégé en 23 branches (dont notamment les industries grandes consommatrices d'énergie), le secteur du transport en 15 types de demande de mobilité avec une distinction passagers et marchandises, le secteur résidentiel et tertiaire en 6 et 20 types de demande respectivement dont notamment le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisson et enfin l'agriculture en 4 branches.

**Tableau 1 – Nomenclature des demandes de service énergétique par secteur**

Secteur	Demande
Industrie	Sidérurgie
	Aluminium
	Cuivre
	Autres métaux non ferreux
	Ammoniac
	Chlore
	Autres produits chimiques
	Ciment
	Chaux
	Verre creux
	Verre plant
	Autre minéraux non métalliques
	Extraction
	Alimentation
	Habillement
	Papier haute qualité
	Papier basse qualité
	Matériel de transport
	Construction mécanique
	Bois
	Autres industries
	Consommation non énergétique - Chimie
	Consommation non énergétique - Autres

<b>Secteur</b>	<b>Demande</b>
Transport	Voiture courte distance
	Voiture longue distance
	Moto
	VUL passagers
	VUL marchandises
	Bus urbain
	Bus interurbain
	Poids lourds
	Fret ferré
	Ferré passagers léger
	Ferré passagers
	Aviation nationale
	Aviation internationale
	Navigation nationale
Navigation internationale	
Résidentiel	Chauffage Maison individuelle
	Chauffage Appartements
	ECS Maison individuelle
	ECS Appartements
	Cuisson
	Électricité spécifique

Secteur	Demande
Tertiaire	Chauffage Bureaux
	Chauffage CaHoRe
	Chauffage Commerce
	Chauffage Enseignement
	Chauffage Habitat communautaire
	Chauffage Santé
	Chauffage Sports Loisirs
	Chauffage Transport
	ECS Bureaux
	ECS CaHoRe
	ECS Commerce
	ECS Enseignement
	ECS Habitat communautaire
	ECS Santé
	ECS Sports Loisirs
	ECS Transport
	Cuisson
	Électricité spécifique
	Éclairage public
Autres	
Agriculture	Bâtiments
	Transformation
	Tracteurs
	Autres

### 3. Un modèle d'optimisation linéaire piloté par la demande

Les modèles TIMES opèrent une optimisation intertemporelle sur un horizon de quelques décennies du coût total actualisé associé au système énergétique, tout en tenant compte de différentes contraintes dont la principale est la satisfaction de la demande de services énergétiques.

Le résultat de cette minimisation propose le bouquet optimal de technologies qui seront déployées sur l'horizon considéré ainsi que leurs niveaux d'activité. La représentation du système énergétique de référence associé au modèle permet de prendre en compte les substitutions possibles entre les différents vecteurs énergétiques pour les différents secteurs, d'estimer l'impact de l'évolution des coûts des énergies et des technologies mais aussi d'évaluer les conséquences sur le système énergétique d'une contrainte de baisse des émissions CO<sub>2</sub>.

Le problème d'optimisation linéaire à résoudre est le suivant :

$$\min \sum_{y \in \text{years}} (1 + d_y)^{\text{REFYEAR} - y} * \text{ANNCOST}(y)$$

où :

- *ANNCOST*(*y*) : le coût annuel du système qui comprend entre autre les coûts d'investissement, les coûts fixe de fonctionnement et les coûts variables ;
- *d<sub>y</sub>* : le taux d'actualisation ;
- *REFYEAR* : l'année de référence pour l'actualisation ;
- *years* : toutes les années entre l'année de référence et la fin de l'horizon du modèle ;

et est soumis à un ensemble de contraintes :

- la demande en services énergétiques renseignée de façon exogène doit être satisfaite ;
- contraintes techniques :
  - limites de disponibilité des technologies : l'activité des technologies est limitée par des facteurs de disponibilité ;
  - efficacité des technologies : elle permet de relier la consommation des vecteurs énergétiques d'entrée aux commodités de sortie de la technologie ;
  - équilibre des vecteurs énergétiques : le niveau de production d'un vecteur énergétique doit être supérieur à son niveau de consommation ;
  - accumulation des capacités : la capacité installée à une période donnée doit correspondre à la capacité résiduelle de la période précédente augmentée des nouveaux investissements ;
  - contrainte de « peak » dans le secteur de l'électricité : pour une certaine période (habituellement le peak durant l'hiver pour un pays comme la France), la capacité totale de production des technologies produisant de l'électricité doit être supérieure d'un certain pourcentage à la demande moyenne de cette période. Elle

fait office de marge de sécurité vis-à-vis d'évènements extrêmes (hiver froid par exemple) qui ne sont pas explicitement représentés dans le modèle ;

- contraintes en ressources : limites de potentiel de déploiement des EnR, limite dans les imports de pétrole ou dans les ressources d'énergie primaire, etc. ;
- contraintes environnementales ou politiques : limites d'émissions, taxes sur certains secteurs ou subventions.

Tout comme la demande de service énergétique, l'évolution des prix des énergies (comme le pétrole ou le gaz) est renseignée de manière exogène. L'optimisation est réalisée sur toute la période temporelle considérée en supposant donc une connaissance parfaite du futur : tous les développements techniques, économiques et politiques sont supposés connus.

#### 4. Le découpage temporel du modèle

L'horizon du modèle s'étend de 2014, année de calibrage du système énergétique, à 2050. Cette période 2014-2050 est divisée en plusieurs pas de temps : les premiers ont une durée d'un an et à partir de 2021, les pas de temps ont une durée de cinq ans. Les résultats sont donnés pour chaque année médiane du pas de temps considéré.

Les années sont subdivisées en quatre saisons et trois types de moments de la journée (D, N et P) ce qui donne 12 TimeSlices. Les quatre saisons correspondent à l'été, l'automne, l'hiver et le printemps. Le moment D de la journée correspond à la journée des jours ouvrés, N à la nuit des jours ouvrés ainsi qu'à la nuit et à la journée des jours fériés, et P au peak d'un jour ouvré. Ce fin découpage temporel permet de prendre en compte les variations de production de certaines technologies comme les panneaux photovoltaïques ainsi que les variations du niveau des demandes de service énergétique.

#### 5. Détermination de la valeur marginale du CO<sub>2</sub>

Le modèle TIMES-FR permet de calculer les émissions CO<sub>2</sub> à partir des consommations d'énergie. Il comptabilise donc uniquement les émissions générées par la combustion d'énergies associées au fonctionnement du système énergétique en se restreignant aux émissions CO<sub>2</sub>. Celles-ci représentent toutefois la majeure partie (près de 98 % en 2014) des émissions de gaz à effet de serre dues à la combustion d'énergies, ce qui constitue donc une bonne approximation pour réfléchir aux enjeux de la décarbonation du système énergétique.

Pour évaluer le coût associé à une contrainte de réduction des émissions, on complète la formulation optimale de TIMES décrite précédemment par une contrainte en volume d'émissions CO<sub>2</sub> du système énergétique. Cette contrainte est définie sous forme de trajectoire d'évolution avec des points de relai qui ont été fournis par France Stratégie avec notamment un point de passage en 2030 à – 43 % par rapport à 1990 pour les émissions énergétiques et un point en 2050 à 21 Mt. Ces deux points ont été construits pour correspondre respectivement à l'engagement de la LTECV<sup>4</sup> de réduire l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre de 40 % en 2030 et à l'annonce de l'objectif de neutralité carbone en 2050 dans le Plan Climat.

À la solution optimale (primale) du problème d'optimisation est associée la valeur duale de la contrainte. Cette valeur duale correspond au coût marginal du CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire l'impact induit sur le coût total actualisé si on augmentait la valeur de la contrainte d'une unité (ici il s'agit d'un coût supplémentaire). Ce coût marginal (valeur duale) est une valeur qui indique finalement le surcoût que la contrainte de décarbonation induit sur le système énergétique. Il constitue une indication pertinente pour élaborer la valeur du carbone.

## Références

Assoumou E. et Maïzi N. (2011), « [Carbon value dynamics for France: A key driver to support mitigation pledges at country scale](#) », *Energy Policy*, Special Section: Renewable energy policy and development 39, p. 4325-4336,

Krakowski V., Assoumou E., Mazauric V. et Maïzi N. (2016), « [Feasible path toward 40–100% renewable energy shares for power supply in France by 2050: A prospective analysis](#) », *Applied Energy*, 171, p. 501-522.

Maïzi N., Assoumou E. (2014), « [Future prospects for nuclear power in France](#) », *Applied Energy*, 136, p. 849-859.

Millot A., Doudard R., Gallic T. L., Briens F., Assoumou E. et Maïzi N. (2018), « [France 2072: Lifestyles at the core of carbon neutrality challenges](#) », in: *Limiting Global Warming to Well Below 2 °C: Energy System Modelling and Policy Development*, Lecture Notes in Energy, Springer, Cham, p. 173-190.

---

<sup>4</sup> Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

## Bibliographie

Assoumou E. (2006), *Modélisation MARKAL pour la planification énergétique long terme dans le contexte français* (phdthesis), École nationale supérieure des Mines de Paris.

Loulou R., Goldstein G., Kanudia A., Lettila A. et Remme U. (2016), *Documentation for the TIMES Model, Part I: TIMES concepts and theory*, ETSAP.







## COMPLÉMENT 8

# LE MODÈLE POLES

---

Sylvain Cail<sup>1</sup> et Quentin Bchini<sup>1</sup>

### 1. Description générale

POLES<sup>2</sup> (*Prospective Outlook for Long-term Energy Systems*) est un modèle de type technico-économique, de simulation en équilibre partiel du secteur énergétique mondial et par pays à horizon prospectif 2050. Il s'agit d'un modèle économie-énergie-environnement codéveloppé et utilisé par Enerdata, l'université Grenoble-Alpes Métropole (laboratoire GAEL, et le Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC Séville).

L'approche de modélisation est basée sur une simulation récursive année après année, reposant sur une base de données historiques couvrant la période 2000-2017, et dans laquelle les projections sont calculées via des ajustements progressifs des variables d'offre et de demande d'une part, et des prix des énergies d'autre part.

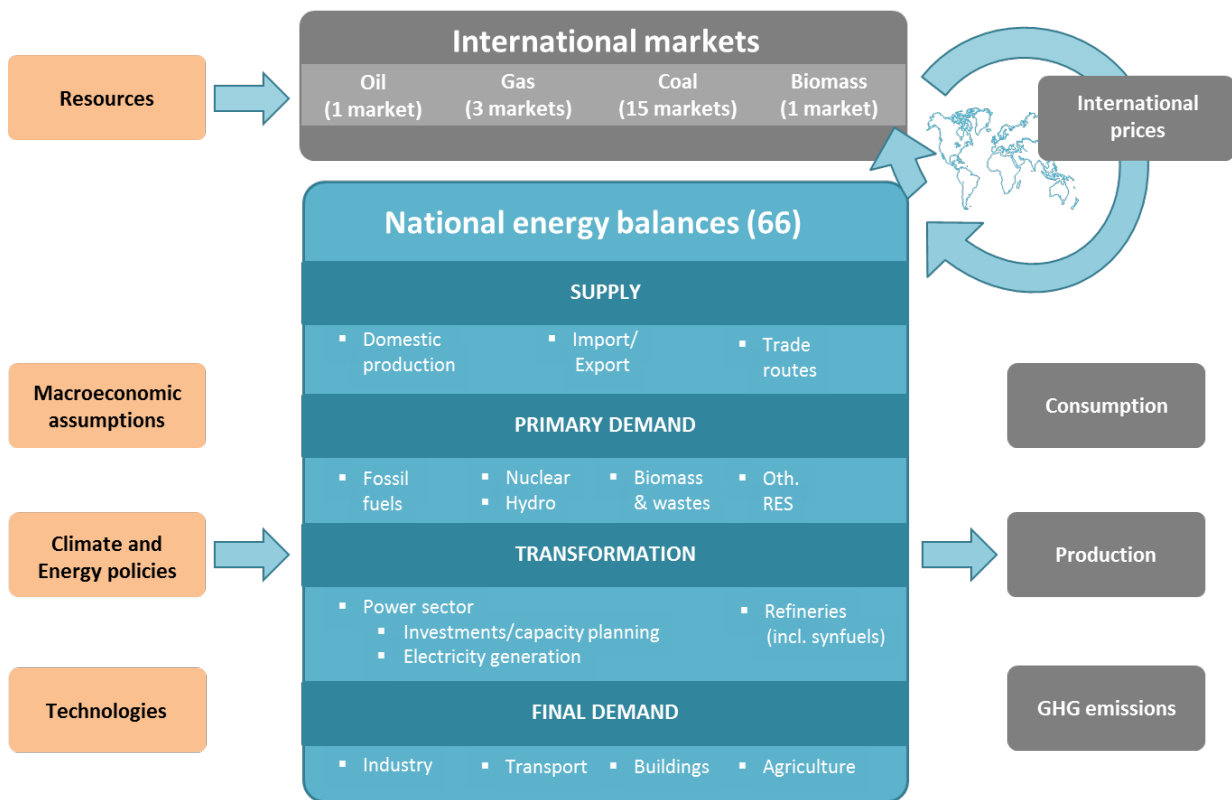
Le modèle est construit selon une structure hiérarchisée de modules, interconnectés à plusieurs niveaux : mondial, régional et national. Sur le plan national, le modèle intègre différents modules d'exploration et de production d'énergies fossiles et renouvelables, de transformation – avec notamment une description détaillée du secteur électrique –, et de consommation. Sur les plans régionaux et mondiaux, POLES intègre les flux d'échanges de commodités ainsi qu'un module de calcul des prix internationaux et régionaux des combustibles fossiles.

---

<sup>1</sup> Enerdata.

<sup>2</sup> [www.enerdata.net/solutions/poles-model.html](http://www.enerdata.net/solutions/poles-model.html).

### Structure générale du modèle POLES



La couverture géographique de POLES comprend un total de 66 pays/régions, à savoir 44 pays individuels (dont le G20 et les États membres de l'Union européenne) ainsi que 12 agrégats régionaux. Ainsi, POLES peut être utilisé pour traiter de problématiques énergie-climat à la fois au niveau mondial, par continent, et par pays individuel.

## Couverture géographique

**66 countries/regions**

Regions	Sub-regions	Countries	Country aggregates
North America		USA, Canada	
Europe	EU15	France, United Kingdom, Italy, Germany, Austria, Belgium, Luxembourg, Denmark, Finland, Ireland, Netherlands, Sweden, Spain, Greece, Portugal	
	EU25	Hungary, Poland, Czech Republic, Slovak Republic, Estonia, Latvia, Lithuania, Slovenia, Malta, Cyprus, Croatia	
	EU28	Bulgaria, Romania Iceland, Norway, Switzerland, Turkey	Rest of Europe
Japan – South Pacific		Japan, Australia, New Zealand	Rest of South Pacific
CIS		Russia, Ukraine	Rest of CIS
Latin America	Central America	Mexico	Rest of Central America
	South America	Brazil, Argentina, Chile	Rest of South America
Asia	South Asia	India	Rest of South Asia
	South East Asia	China, South Korea, Indonesia, Malaysia, Thailand, Viet Nam	Rest South East Asia
Africa / Middle East	North Africa	Egypt,	Rest of North Africa x2;
	Sub-Saharan Africa	South Africa	Rest of Sub-Saharan Africa;
	Middle-East	Saudi Arabia, Iran	Gulf countries; Rest of Middle East

POLES utilise un grand nombre de données d'entrée, notamment sur la période historique (2000-2017). En particulier, les évolutions démographiques et économiques (PIB, valeurs ajoutées sectorielles) sont considérées comme exogènes, ainsi que les hypothèses retenues sur les ressources énergétiques disponibles.

Les évolutions de l'ensemble des variables caractérisant la consommation, la transformation, la production et les prix des énergies sont calculées de manière endogène dans le modèle. Au niveau de la demande d'énergie, POLES représente plus de 15 sous-secteurs de l'industrie, du transport, du résidentiel et de l'agriculture.

Le module électricité de POLES permet de simuler l'évolution du système électrique avec la représentation explicite d'une trentaine de filières paramétrées sur les plans technique, économique et environnemental. Le modèle détermine l'évolution des capacités de production à l'aide d'une fonction de répartition de type logit basée sur les coûts relatifs des technologies. L'évolution du mix électrique est ensuite calculée, en fonction notamment de la demande finale d'électricité, de l'arrivée en fin de vie de centrales existantes et des coûts complets actualisés de production.

Le modèle POLES est particulièrement adapté à la prise en compte et l'analyse d'objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre par l'introduction d'une « valeur du carbone » dans les différents modules (reflétant des permis négociables, une taxe carbone ou une valeur de « signal-prix » nécessaire à l'atteinte d'un objectif), ou, le cas échéant, des valeurs de certificats blancs ou de subventions directes à l'achat ou à la production d'EnR. Le modèle inclut les six gaz à effets de serre désignés par le protocole de Kyoto, dont le CO<sub>2</sub>.

## 2. Caractéristiques détaillées

L'approche méthodologique retenue dans POLES peut être considérée comme hybride, fondée à la fois sur :

- une approche de type « top-down » pour les secteurs de consommation, dont les niveaux de demande sont directement reliés, via des équations économétriques, aux variables d'activité, de prix et de technologies ;
- une approche de type « bottom-up » pour le secteur électrique, avec une représentation explicite de chaque classe technologique.

Le modèle POLES utilise une base de données conséquente dont les principales sources sont : IEA, Banque mondiale, IMF, CEPIL, Eurostat, International Road Federation, UNFCCC, EDGAR, IPCC Assessment Reports, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, World Resources Institute, Wind Atlas, DLR. Les données d'entrée du modèle sont augmentées de nombreuses sources nationales, directement collectées et traitées par l'équipe Market Research d'Enerdata. L'ensemble des données de POLES sont mises à jour annuellement dans le cadre de l'exercice de scénarisation EnerFuture<sup>3</sup> (ajoutant ainsi une nouvelle année d'historique et mettant à jour l'ensemble de la période historique depuis 2000).

La valeur du carbone modélisée dans POLES reflète le signal-prix global nécessaire aux secteurs émetteurs pour atteindre un objectif de réduction d'émissions donné. Cette valeur du carbone peut être appliquée au niveau national, sectoriel ou multi-sectoriel. Appliquée aux secteurs soumis à un marché de permis négociables, cette valeur peut être interprétée comme une approximation du prix des permis observé sur le marché. Appliquée aux autres secteurs, cette valeur reflète le signal-prix comprenant l'ensemble des politiques contribuant à réduire les émissions de gaz à effet de serre, incluant à titre d'exemple tout instrument normatif sur l'efficacité, les régulations sur la qualité de l'air, ou une taxe carbone.

---

<sup>3</sup> [www.enerdata.fr/research/prevision-demande-energetique-enerfuture.html](http://www.enerdata.fr/research/prevision-demande-energetique-enerfuture.html).

La modélisation énergie-environnement de POLES permet d'internaliser cette valeur du carbone dans les technologies et secteurs émetteurs, venant altérer la compétitivité entre énergies et entre technologies. En sortie, POLES permet de fournir les bilans énergétiques et d'émissions (six gaz à effet de serre) complets, par sous-secteur et par énergie, pour l'ensemble des pays et régions modélisées et à pas annuel sur l'ensemble de la période 2000-2050.

POLES n'est pas un modèle d'optimisation intertemporelle. La récursivité, année après année, sur laquelle se base le modèle, ne permet ainsi pas de prendre directement en compte les phénomènes d'anticipation qui permettraient à titre d'exemple de peser sur les décisions d'investissement de long terme dans les technologies décarbonées. Cependant, plusieurs nouvelles approches sont actuellement testées dans le modèle POLES, dans le cadre de projet de recherche et développement, permettant de prendre en compte des budgets carbone glissants ainsi que des mécanismes d'optimisation de la valeur carbone sur un horizon temporel de plusieurs décennies.

Le modèle POLES permet à la fois de prendre en compte des hypothèses de coûts des technologies alignées sur des sources reconnues (notamment IEA), mais des courbes d'apprentissages endogènes sont implémentées dans le modèle, permettant de considérer une baisse des coûts des technologies (dont celles renouvelables et non émettrices de gaz à effet de serre) en fonction de la capacité installée dans les projections de long terme.

## Principales références

Criqui P., Mima S. *et al.* (1999), « Marginal abatement costs of CO<sub>2</sub> emission reductions, geographical flexibility and concrete ceilings: An assessment using the POLES model », *Energy Policy*, vol. 27, issue 10, p. 585-601.

Criqui P., Mima S., Menanteau P. et Kitous A. (2015), « Mitigation strategies and energy technology learning: An assessment with the POLES model », *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 90, Part A, p. 119-136.

Després J., Mima S., Kitous A., Criqui P., Hadjsaid N. et Noirot I. (2017), « Storage as a flexibility option in power systems with high shares of variable renewable energy sources: A POLES-based analysis », *Energy Economics*, Vol. 64, mai, p. 638-650.

Enerdata, Énergies demain, Seurco-Erasme, CITEPA, Mines ParisTech, Armines, ADEME, IFPen (2015), « [Scénarios prospectifs Énergie-Climat-Air pour la France à l'horizon 2035](#) ».

European Commission – Joint Research Centre (2015), « Analysis of scenarios integrating the INDCs », *JRC Policy Brief*, European Commission, Joint Research Centre, octobre, JRC97845.

Kitous A., Criqui P., Bellevrat E. et Chateau B. (2010), « Transformation patterns of the worldwide energy system – Scenarios for the century with the POLES model », *The Energy Journal*, vol. 31 (Special Issue 1: The Economics of Low Stabilization), International Association for Energy Economics (IAEE), Cleveland, Ohio, USA.

Le Strat F., Pelourdeau E. *et al.* (2014), « Interactions between CO<sub>2</sub> and RES targets: A cost assessment of European Energy Climate Policies with POLES model », *Les Cahiers de la Chaire Économie du climat, Working Paper Series*, n° 2014-04.

Mima S. et Criqui P. (2015), « The costs of climate change for the European energy system: An assessment with the POLES model », *Environmental Modelling and Assessment*, doi:10.1007/s10666-015-9449-3.

Rivera G. L., Reynès F, Cortes I. I., Bellocq F. X. et Grazi F (2016), « Towards a low carbon growth in Mexico: Is a double dividend possible? A dynamic general equilibrium assessment », *Energy Policy*, vol. 96, septembre, p. 314-327.

Vailles C., Alberola E., Farrokhi B., Cassisa C. et Bonnefous J. (2018), « [Mind the gap: Aligning the 2030 EU climate and energy policy framework to meet long-term climate goals](#) », *Climate Brief*, n° 52, Institute for Climate Economics, avril.

Vandycka T., Keramidas K., Saveyn B., Kitous A. et Vrontisi Z. (2016), « A global stocktake of the Paris pledges: Implications for energy systems and economy », *Global Environmental Change*, vol. 41, novembre, p. 46-63.



## COMPLÉMENT 9

# LE MODÈLE IMACLIM-R FRANCE

---

Meriem Hamdi-Cherif, Franck Lecocq et Julien Lefèvre<sup>1</sup>

### 1. Description générale

IMACLIM-R France est un modèle d'équilibre général récursif dynamique qui modélise l'évolution de l'économie française en économie ouverte et décomposée en quinze secteurs : énergie (pétrole brut, pétrole raffiné, gaz, charbon et électricité), transport (transport routier de marchandises, transport par voie d'eau, transport aérien, transport de passagers et transport public routier de personnes), construction, industries intensives en énergie, agriculture et services.

IMACLIM-R France est un modèle hybride par construction qui combine approche macroéconomique et approche technico-économique. Il s'appuie sur un cadre comptable hybride décrivant simultanément les flux en valeur monétaire et en unité physique pour les vecteurs énergétiques et certains indicateurs d'activité pour les secteurs transport et résidentiel. La modélisation intégrée des trajectoires macroéconomiques et technologiques repose sur une architecture récursive basée sur l'échange d'informations à pas de temps annuel entre un équilibre macroéconomique multisectoriel et des modules dynamiques dont des modules technico-économiques sectoriels. Cette architecture permet de prendre en compte à chaque période les contraintes liées à la fois au bouclage macroéconomique et aux possibilités techniques explicites. En particulier IMACLIM-R France inclut des modules technico-économiques détaillés pour les secteurs clés de la transition énergétique en France, dont le secteur électrique, le transport de passagers et le secteur résidentiel. Ces modules offrent une représentation explicite des dynamiques technologiques et des générations d'équipement associées.

---

<sup>1</sup> Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED).

Enfin, IMACLIM-R France est un modèle de simulation de trajectoires macro-économiques et énergétiques dans un monde de « second rang » caractérisé par l'inertie des équipements et du capital installés, des anticipations imparfaites des agents économiques pour leurs choix d'investissement, des marchés imparfaits et l'utilisation partielle des facteurs de production (travail et capital).

## 2. Caractéristiques détaillées

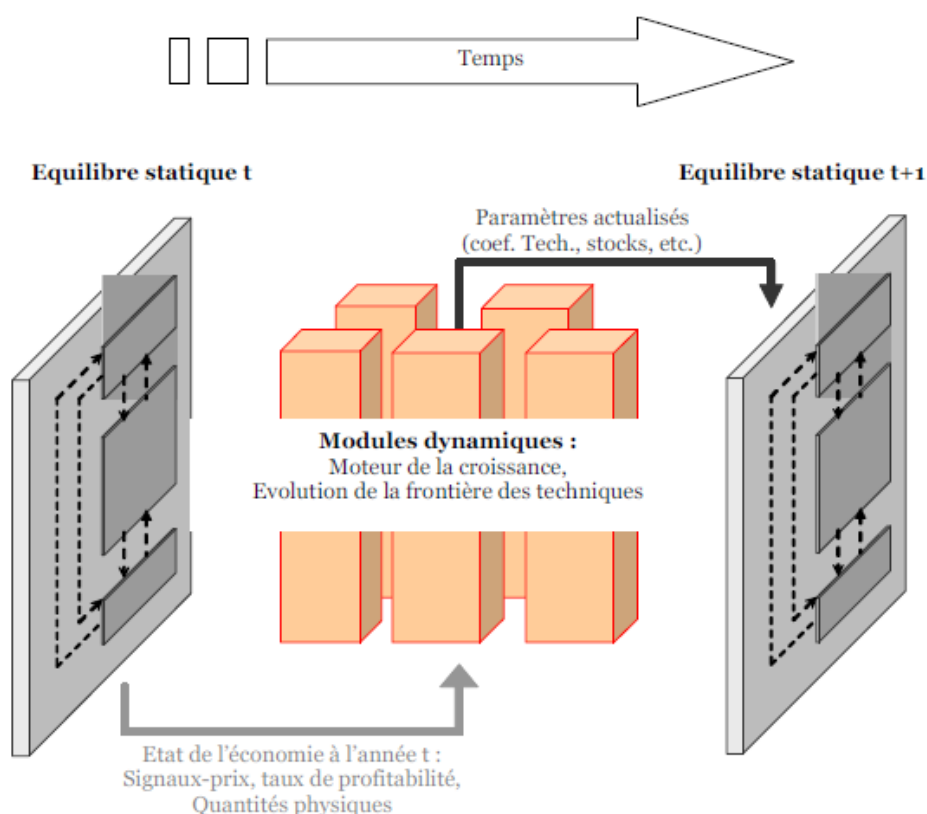
Dans IMACLIM-R France, la modélisation en équilibre général hybride s'appuie sur un système de comptabilité double des flux en valeur physique et monétaire qui permet de décrire de façon cohérente l'ensemble des interactions entre les secteurs demandeurs d'énergie, les secteurs énergétiques et le reste de l'économie. L'existence de variables en unité physique (stock d'automobiles, nombre de passager.km, mètres carrés de logement, efficacité énergétique des technologies, etc.) ouvre la voie à l'inclusion rigoureuse de données sectorielles relatives à l'impact des incitations économiques sur la demande finale et la dynamique des systèmes techniques. Chaque année, l'évolution technico-économique fournit un bilan comptable et physique équilibré, duquel découle un certain nombre d'indicateurs (PIB, prix sectoriels, bilan énergétique, investissements sectoriels, consommation des ménages en différents biens et services, taux de chômage, commerce international, etc.). La mise en place de cette comptabilité exige un travail spécifique d'harmonisation des matrices de comptabilité sociale, des bilans énergétiques et des indicateurs d'activité physique (t.km, passager.km, etc.).

Au sein de l'architecture dynamique récursive, la relation entre deux équilibres macroéconomiques annuels consécutifs s'opère à l'aide d'un module dynamique général (informant la dynamique démographique, de productivité générale des facteurs, d'évolution des conditions aux frontières sur les prix des énergies fossiles et la demande mondiale, etc.) et de modules dynamiques sectoriels. Ces modules sectoriels sont plus ou moins détaillés et représentent les dynamiques propres à chaque secteur, compte tenu des contraintes économiques (investissement disponible, consommations intermédiaires et coût de l'énergie) et physiques (par exemple, l'inertie des infrastructures technologiques et des équipements, facteur limitant les progrès de l'efficacité énergétique, asymptotes technologiques). En pratique, chaque année l'équilibre macroéconomique « envoie » aux modules sectoriels des informations sur le nouvel état de l'économie en termes de prix relatifs et niveaux d'activité. Sur cette base à chaque date « t », les modules technicoéconomiques calculent la réponse de chaque secteur à ces informations en termes de choix d'investissement et de technologies encapsulées dans la nouvelle génération de capital permettant l'actualisation des coefficients techniques pour chaque secteur qui va alimenter l'équilibre macroéconomique suivant à t+1. Dit autrement, les modules sectoriels représentent les choix de production/consommation *ex ante* en début d'année (liés à l'installation de nouveaux capital / équipements) sous contrainte d'inves-



tissement disponible (fourni par l'équilibre économique de l'année  $t$ ) et le rebouclage macroéconomique s'opère sur les choix de production/consommation *ex post* à capacités de production données lors de l'équilibre économique suivant à  $t+1$ .

Figure 1 – Dynamique récursive du modèle IMACLIM-R (Fr)



IMACLIM-R France inclut des modules technico-économiques détaillés pour la production électrique et les secteurs transport et résidentiel.

Le module électricité distingue 26 technologies de production (conventionnelles, renouvelables, etc.) caractérisées par leurs coûts dont fixes et variables (capital, opération et maintenance, etc.). À chaque pas de temps, sur la base d'une projection de demande et de prix des combustibles futurs, le module estime le parc de production futur coût-optimal (coût total actualisé) nécessaire pour satisfaire la demande future anticipée d'électricité caractérisée par une courbe de charge annuelle et sous contrainte techniques spécifiques (potentiel, intermittence des renouvelables, etc.). Sur cette base, le module calcule les investissements de court terme nécessaires à la réorientation marginale du parc existant vers ce parc optimal compte tenu des caractéristiques du parc existant (technologies et durée de vie restante des capacités de production).

Le module véhicules légers distingue 8 classes de véhicules (dont véhicules thermiques standards, hybrides et électrique) caractérisées par des technologies et efficacités énergétiques différentes. À chaque pas de temps, le module calcule les parts de marché de chaque classe dans la génération annuelle de véhicule sur la base de leurs coûts complets actualisés (dont coût d'achat des véhicules et dépenses en carburant) et transmet à l'équilibre économique suivant les nouvelles caractéristiques du parc moyen. Au-delà le modèle distingue trois autres modes de transport passagers (transport public terrestre, aérien et non motorisé) et la substitution entre ces modes s'opère via la fonction d'utilité de l'équilibre économique sous contrainte de budget économique, budget-temps et d'infrastructures installées par mode. Enfin, pour chaque mode de transport passager et fret (terrestre et mer), l'évolution de l'efficacité énergétique et du mix énergétique est déterminée par des élasticités de substitution combinées à des asymptotes techniques.

Le module résidentiel détaille la dynamique du stock de bâtiments selon différentes classes de logement et selon les différents usages énergétiques domestiques (chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, réfrigération, appareils électroniques, etc.). La surface de logement par habitant répond à une élasticité-revenu avec asymptote. Enfin les autres secteurs dont l'agriculture, l'industrie et les services font l'objet de modules dynamiques simplifiés et l'évolution de leur intensité et mix énergétique s'opère par du progrès technique et des élasticités de substitution.

De manière générale les choix d'investissement contrôlés par les modules dynamiques sont réalisés sous anticipation imparfaite et adaptative des signaux économiques futurs (prix et demande espérée) selon des modalités propres à chaque secteur (extrapolation des tendances passées, horizon de projection, etc.). Néanmoins, dans le cadre de cet exercice et conformément à la conception d'une trajectoire de valeur tutélaire du carbone connue à l'avance par les agents économiques, le prix futur du carbone fait exception et est parfaitement anticipé par les agents économiques et inclus dans leur calcul économique selon des horizons de projection propres à chaque secteur (entre t+5 et t+20).

Le modèle représente des mécanismes de progrès technique autonome et induit sur l'énergie et la décarbonation aux niveaux sectoriel et technologique. Dans l'industrie, l'agriculture, les services, le transport public et le fret, une tendance de progrès technique autonome réduit l'intensité énergétique moyenne des secteurs au cours du temps. Dans l'industrie, ce mécanisme synthétise l'effet combiné de gains d'efficacité énergétique « au fil de l'eau » et d'un changement structurel lié à la baisse de la part des industries lourdes. Dans les secteurs électricité, véhicules légers et résidentiel, cette tendance de progrès technique autonome intervient à l'échelle technologique et correspond à des gains d'efficacité énergétique. Le modèle représente également des mécanismes de progrès technique induit avec induction par les prix (prix du carbone) ou par la pratique

(*learning-by-doing*). L'induction par les prix opère au niveau des « méta-secteurs » via des élasticités des intensités énergétiques au prix du carbone. Le progrès technique par apprentissage intervient au niveau technologique pour la production électrique et les véhicules légers. Le coût d'une technologie décroît et/ou son efficacité énergétique augmente en fonction du cumul d'investissement dans cette technologie selon des courbes d'apprentissage.

Au niveau macroéconomique, la modélisation de l'économie française en économie ouverte nécessite des hypothèses sur les conditions aux frontières de la France. Importations et exportations évoluent selon des élasticités aux termes de l'échange entre la France et le reste du monde. Les exportations françaises suivent des tendances exogènes hors effet prix tirées par la demande mondiale. Les prix mondiaux suivent également des tendances exogènes, les prix des énergies fossiles en particulier.

La trajectoire de croissance est principalement déterminée par la démographie, les gains de productivité du travail, la demande et les prix mondiaux et le progrès technique sur l'énergie mais IMACLIM-R France modélise spécifiquement l'écart dynamique entre une croissance naturelle ou potentielle et une croissance réelle qui résulte des frictions engendrées par des comportements en information imparfaite, l'inertie des systèmes techniques et des marchés imparfaits.

En synthèse, IMACLIM-R France décrit des trajectoires de croissance d'une économie en prix et en quantités, et permet d'en étudier les caractéristiques en termes de grands équilibres économiques (fiscalité, transferts, financement de l'état, importations, exportations, compétitivité) et de prix relatifs, cela pour différentes visions du changement technique et différentes hypothèses sur le monde extérieur (croissance mondiale, prix du pétrole principalement). Décrivant de façon explicite les inerties dans les capacités de production, les infrastructures, les équipements des ménages, la structure d'IMACLIM-R permet de prendre en compte les difficultés dans les sentiers de transition dues aux frictions du court terme en particulier. En sens inverse, parce que l'économie ne fonctionne pas nécessairement de façon optimale, il y a des possibilités de sous-utilisation des capacités installées et de la main-d'œuvre, lesquelles permettent de décrire la capacité de rapprocher l'économie réelle de sa « croissance potentielle » et d'examiner dans quelle mesure ce rapprochement permet de contrebalancer les coûts économiques des « frictions » de court terme. Sur le moyen et long terme, parce qu'il fonctionne selon une logique de progrès technique endogène, avec des effets d'apprentissage dépendant du cumul d'investissements sur une technologie donnée, il peut représenter les gains venant d'un déplacement de la « frontière » de production.

## Références

Bibas R., Mathy S. et Fink M. (2012), *An “acceptable” low carbon scenario for France: Participatory scenario design and economic assessment*, Final deliverable ENCILOW-CARB project.

Bibas R. et Hourcade J.-C. (2013), « *Transitions énergétiques en France : enseignements d'exercices de prospective* », Contribution au débat national sur la transition énergétique, *CIREC Working Papers*, n° 2013-51.

Mathy S., Fink M. et Bibas R. (2015), « *Rethinking the role of scenarios: Participatory scripting of low-carbon scenarios for France* », *Energy Policy*, 77, p. 176-190.

Bibas R., Hourcade J.-C. et Cassen C. (2017), « *Évaluation macro-économique de la trajectoire bas carbone de l'UFE avec IMACLIM-R (Fr)* », rapport CIREC-SMASH-UFE.



## COMPLÉMENT 10

# LE MODÈLE NEMESIS

---

Baptiste Boitier, Arnaud Fougeyrollas, Gilles Koléda,  
Pierre Le Mouël et Paul Zagamé<sup>1</sup>

### 1. Description générale

Le modèle NEMESIS est un système de modèles économétriques sectoriels détaillés (30 secteurs d'activité) élaborés pour chacun des pays de l'Union européenne. Il est destiné à la prospective quantitative et à l'analyse (l'évaluation) des politiques économiques, notamment les politiques dites « structurelles » dont les effets atteignent les moyen et long termes (recherche et innovation, environnement, énergie, fiscalité, budget, etc.). Il se distingue d'autres modèles économiques en ce qu'il détermine le sentier de croissance macroéconomique par une dynamique complexe résultant d'évolutions sectorielles, de forces d'interdépendance entre secteurs très hétérogènes et de « retours macroéconomiques ».

Le modèle s'écarte de la structure traditionnelle des modèles économétriques « néo-keynésiens » en ce sens que le bloc « offre » incorpore des propriétés tirées des nouvelles théories de la croissance : progrès technique endogène, performance économique dépendant des investissements en R & D, TIC, logiciels, formation, et des externalités de connaissance. Cependant, cette version endogène du progrès technique n'a pas été utilisée dans cette étude.

L'international (hors Europe) est principalement formalisé par la modélisation des échanges extérieurs avec les différentes régions du monde (les principales économies sont distinguées hors Europe). Cette formalisation est étendue pour les États-Unis et le Japon à la représentation des échanges de connaissances scientifiques avec l'Europe.

---

<sup>1</sup> SEURECO (Société européenne d'économie).

Dans NEMESIS, les prix sont déterminés selon la logique de la concurrence monopolistique par un taux de mark-up appliqué aux coûts, c'est-à-dire que les entreprises répercutent 100 % de la baisse relative des coûts. Les salaires sont déterminés selon un modèle WS-PS qui, dans certains cas, se réduit à une courbe de Phillips augmentée. Le cœur des mécanismes du modèle résulte de l'arbitrage d'agents représentatifs, anticipant de manière imparfaite l'évolution des variables de prix pour prendre leurs décisions d'investissement et de consommation.

L'équilibre offre/demande des produits résulte du comportement optimisateur (1) des entreprises (soit une entreprise représentative par secteur d'activité) modifiant leur mix de facteurs de production en fonction de l'évolution de leurs coûts relatifs (coût du capital lié au taux d'intérêt, salaires, prix de l'énergie) et de leur degré de complémentarité/substituabilité (soit de la technologie des secteurs), (2) des ménages procédant d'abord à un partage entre consommation finale et épargne puis allouant leur budget entre différents postes de consommation (27 au total) en fonction de l'évolution des prix relatifs de ces postes et (3) du Reste du monde dont les échanges commerciaux dépendent de la compétitivité relative des entreprises des pays européens et du niveau d'activité.

Ainsi le modèle permet de construire des scénarios prospectifs quantitatifs et de simuler les réactions à un choc exogène, qu'il soit de politique économique ou de l'environnement international, et de calculer ses conséquences sur le PIB, les composantes du PIB, les prix, l'emploi et cela aussi bien à un niveau macroéconomique que sectoriel, pour l'ensemble de l'Europe ou pour chaque pays.

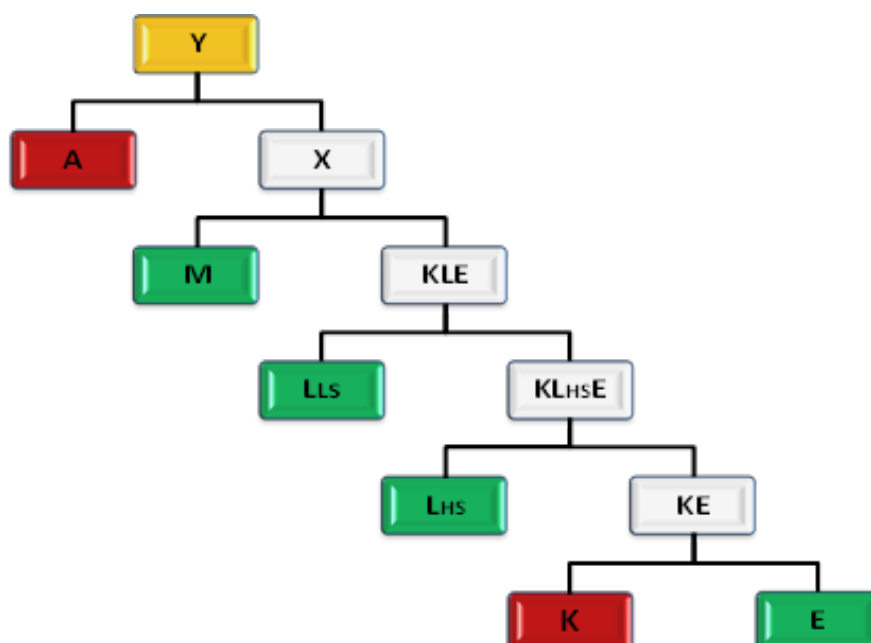
## 2. Le module énergie-environnement

NEMESIS comporte par ailleurs un module énergie-environnement. Ce module détaille les consommations intérimaires et finales énergétiques en produits (pétrole, gaz, charbon, biomasse, etc.) et permet de calculer les consommations énergétiques en unités physiques ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie. Enfin, ce module comprend également une représentation relativement fine de plusieurs technologies de production d'électricité.

### *La représentation de la demande d'énergie du secteur productif*

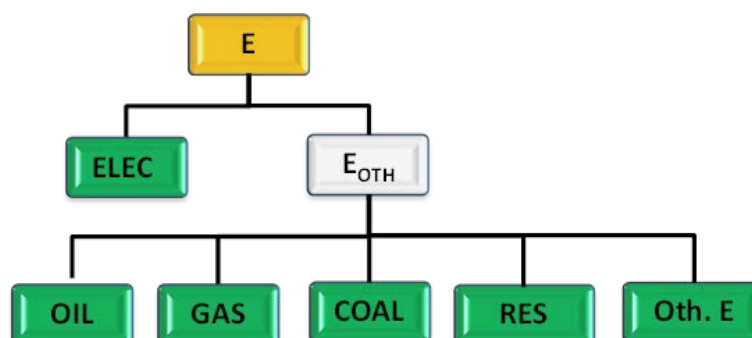
Le modèle NEMESIS utilise des fonctions de production de type CES emboîtées pour représenter les demandes de facteur ; celles-ci prennent la forme ci-dessous (Figure 2).

Figure 2 – Structure CES du modèle NEMESIS pour les facteurs de production



Les élasticités de substitution sont différentes à chaque niveau de la fonction CES et varient également entre secteurs de production, elles ont été majoritairement estimées et quelque fois calibrées. Le facteur « énergie » est donc associé au capital au dernier étage de la fonction CES et il est ensuite divisé entre produits énergétiques (Figure 3) en deux étapes. Un premier niveau de CES distingue l'énergie électrique des autres types de produits énergétiques, avec une élasticité de substitution égale à 0.7. Au niveau inférieur, les autres produits énergétiques sont tous dissociés, ils sont au nombre de 10, avec les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), les énergies renouvelables (biogaz, biocarburants, géothermie, bois et autres biomasses) et les autres produits énergétiques (déchets urbains et industriels). À ce dernier niveau, l'élasticité de substitution est de 0.4.

Figure 3 – Structure CES du modèle NEMESIS pour les produits énergétiques



Cette méthodologie, avec des fonctions de production CES emboîtées, est utilisée pour l'ensemble des secteurs de production à l'exception des secteurs énergétiques où sont distinguées les consommations énergétiques de « process » et autres types de consommation. Les consommations énergétiques dites de « process » sont en fait proportionnelles à la production du secteur (par exemple, la quantité de pétrole brut entrant dans les raffineries est supposée proportionnelle à la quantité de pétrole raffiné sortant des raffineries).

Enfin, une modélisation spécifique existe pour le secteur de la production d'électricité. Chaque source d'énergie nécessaire à la production d'électricité est modélisée à l'aide d'une fonction de réaction qui dépend de la demande totale d'électricité, des coûts complets relatifs de chaque technologie (coûts complets qui intègrent les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance, des intrants énergétiques et du CO<sub>2</sub>) et de la part de cette technologie dans le mixte total ; cette part jouant négativement sur le déploiement de la technologie. Par ailleurs, dans la version actuelle du modèle, les technologies électronucléaire, hydraulique et géothermique sont exogènes.

Du côté des consommateurs, les besoins énergétiques des ménages sont intégrés dans les fonctions de consommation des ménages et suivent la même modélisation que ces dernières. La détermination de la consommation suit un processus en plusieurs étapes. Dans une première étape, le modèle détermine le volume global de consommation finale des ménages en liant la consommation agrégée et les revenus et la richesse. Dans une seconde étape, la consommation agrégée des ménages est divisée en 27 postes de consommation à l'aide d'un module d'allocation, lequel suppose une séparabilité par groupe. Autrement dit, le consommateur représentatif alloue sa consommation agrégée aux 27 postes de consommation par étapes successives. Dans une première étape, le consommateur décide d'allouer sa consommation entre biens durables et biens non durables. Dans une seconde étape, il alloue la consommation aux sous-groupes associés au type de bien précédemment sélectionné, et ainsi de suite jusqu'à l'allocation aux 27 postes de consommation.

Enfin, les consommations en unités physiques des énergies fossiles permettent de calculer les émissions de CO<sub>2</sub> associées. Ainsi, le modèle ne calcule qu'une partie des GES, le secteur « 1.AA. Fuel Combustion – Sectoral Approach » pour le CO<sub>2</sub>, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur « 1.B. Fugitive emissions » sont également modélisées mais de manière plus frustre. Les autres GES (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) sont comptabilisés mais ne sont pas modélisés, ils suivent des hypothèses exogènes à



définir. Enfin, dans l'état actuel du modèle, les émissions du secteur « LULUCF<sup>2</sup> » ne sont pas prises en compte ni même comptabilisées.

### 3. Références

Le modèle NEMESIS a été élaboré par un consortium européen coordonné par l'équipe ERASME (initialement UP1 et École centrale) et par des universités ou institutions de recherche européennes dont le cœur est constitué par l'UNU-MERIT de Maastricht, l'université polytechnique d'Athènes, le bureau fédéral du plan belge. Le modèle a été continûment financé par des programmes européens de recherche, à partir du FP5 jusqu'à H2020, ce qui a permis un entretien et une amélioration continue de ses mécanismes, pour les maintenir au niveau des standards économétriques du moment. D'autres institutions ont également participé à son financement, il s'agit notamment, en France, du ministère de la Recherche et de la Chambre de commerce et d'industrie de Paris. Aujourd'hui le modèle est amélioré par sa participation à deux programmes de Recherche H2020, SETNAV (énergie et environnement) et I3U (recherche et innovation).

Lors des cinq dernières années, SEURECO a réalisé un nombre important d'études visant à quantifier, à l'aide du modèle NEMESIS, les conséquences économiques en France et/ou dans l'Union européenne de diverses politiques publiques. En termes de fiscalité, SEURECO a réalisé des travaux dans le cadre du Haut Conseil du financement de la protection sociale (HCFi-PS, 2014)<sup>3</sup> ainsi que plusieurs études pour la Direction générale des entreprises (ex-DGCIS)<sup>4</sup>.

NEMESIS a également été utilisé pour des évaluations de politiques publiques (ou scénarios) liées à l'environnement :

- soit en utilisant directement le module énergie-environnement du modèle NEMESIS, avec par exemple le projet européen AMPERE (Capros *et al.*, 2014)<sup>5</sup>, la comparaison

---

<sup>2</sup> *Land-Use, Land-Use Change and Forestry* (utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie).

<sup>3</sup> Haut Conseil du financement de la protection sociale (2014), *Point d'étape sur les évolutions du financement de la protection sociale*, chap. 5, mars.

<sup>4</sup> Travaux n'ayant pas fait l'objet de rapport public, voir par exemple : Assemblée nationale, « [Compte rendu – Mission d'information sur le crédit d'impôt pour la compétitivité et l'emploi](#) », Présidence de M. Olivier Carré, Compte rendu n° 14, XIV<sup>e</sup> Législature, Session extraordinaire de 2013-2014, 17 juillet 2014..

<sup>5</sup> Capros P., Paroussos L., Fragkos P., Tsani S., Boitier B., Wagner F., Busch S., Resch G., Blesl M. et Bollen J. (2014), « European decarbonisation pathways under alternative technological and policy choices: A multi-model analysis », *Energy Strategic Reviews*, n° 2(3-4), p. 213-245. Doi: 10.1016/j.esr.2013.12.007.

de modèles (Boitier *et al.*, 2015)<sup>6</sup> ou encore la revalorisation de la valeur tutélaire du carbone (étude en cours) ;

- soit en couplant le modèle NEMESIS avec d'autres modèles (outils) plus spécifiques, ce fut le cas par exemple au niveau français pour des travaux menés pour la DGEC (MEDDE, 2015)<sup>7</sup> ou pour l'ADEME (Beylot *et al.*, 2016 ; 2017)<sup>8</sup> ou encore au niveau européen avec l'étude EMPLOY-RES II (Duscha *et al.*, 2016)<sup>9</sup> ou le projet de recherche SET-Nav (en cours)<sup>10</sup>.

Enfin, le modèle a été utilisé de nombreuses fois dans l'évaluation des conséquences économiques de politiques publiques en faveur de l'innovation avec l'évaluation *ex ante* des programmes de recherche européens H2020 (EC, 2012 – Annex 5)<sup>11</sup> et post-H2020 (en cours) et des appels à propositions du FP7 (Zagamé, 2010 ; Fougeyrollas *et al.*, 2010, 2011 ; Zagamé *et al.*, 2012)<sup>12</sup>. SEURECO a également participé récemment à l'évaluation « *ex post* » des politiques de recherche européenne (PPMI, 2017 ; EC, 2017)<sup>13</sup>.

L'expérience de l'équipe SEURECO est également importante dans la réalisation de scénarios prospectifs à moyen/long terme. En 2012 et 2014, le modèle NEMESIS avait été mobilisé par France Stratégie (Conseil d'analyse stratégique à l'époque) pour réaliser

---

<sup>6</sup> Boitier B., Callonnet G., Douillard P., Epaulard A., Ghersi F., Masson E. et Mathy S. (2015), « [La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques](#) », *Document de travail*, n° 2015-05, France Stratégie, octobre.

<sup>7</sup> Ministère de l'Écologie et du Développement durable (2015), « [Stratégie nationale bas-carbone – Résumé pour décideurs](#) ».

<sup>8</sup> Beylot A., Boitier B., Lancesseur N. et Villeneuve J. (2016), « A consumption approach to wastes from economic activities », *Waste Management*, Vol. 49, mars, p. 505-515 ; Beylot A., Boitier B., Lancesseur N. et Villeneuve J., « The waste footprint of French households in 2020 – A comparison of scenarios of consumption growth using input-output analysis », *Journal of Industrial Ecology*, forthcoming. Doi: 10.1111/jiec.12566.

<sup>9</sup> Duscha V., Fougeyrollas A., Nathani C., Pfaff M., Ragwitz M., Resch G., Schade W., Breitschopf B. et Walz R. (2016), « Renewable energy deployment in Europe up to 2030 and the aim of a triple dividend », *Energy Policy*, vol. 95, p. 314-323. Doi: 10.1016/j.enpol.2016.05.011.

<sup>10</sup> [www.set-nav.eu](http://www.set-nav.eu).

<sup>11</sup> European Commission (2012), *The Grand Challenge – The design and societal impact of Horizon 2020* », Directorate-General for Research and Innovation. Doi: 10.2777/85874.

<sup>12</sup> Zagamé P. (2010), « [The costs of a non-innovative Europe: What can we learn and what can we expect from the simulations works](#) », EC publications ; Fougeyrollas A., Le Mouél P. et Zagamé P. (2010), « Consequences of the 2010 FP7 Budget on European Economy », DEMETER Project report ; Fougeyrollas A., Le Mouél P. et Zagamé P. (2011), « [Consequences of the FP7 2012 call on European economy and employment](#) », DEMETER Project report ; Zagamé P., Fougeyrollas A. et Le Mouél P. (2012), « [Consequences of the 2013 FP7 call for proposals for the economy and employment in the European Union](#) », DEMETER Project report.

<sup>13</sup> PPMI (2017), « [Assessment of the Union Added Value and the economic impact of the EU Framework Programmes \(FP7, Horizon 2020\)](#) », European Commission ; European Commission (2017), « [In-depth interim evaluation of horizon 2020](#) », *Commission Staff Working Document*, SWD(2017) 221 final, SWD(2017) 222 final.

les projections d'emploi à l'horizon 2020 (CAS, 2012)<sup>14</sup>. Par la suite, SEURECO a participé aux projets européens NEUJOBS (Velselkova *et al.*, 2014)<sup>15</sup> et FLAGSHIP (Boitier *et al.*, 2016)<sup>16</sup> ainsi qu'à l'étude pour le European Political Strategy Centre (Bureau of European Policy Advisers précédemment) menée par le CEPS sur le futur de l'économie européenne dans l'économie mondiale (Gros *et al.*, 2013)<sup>17</sup>.

Enfin, SEURECO participe à différents projets de recherche européens (SIMPATIC, I3U)<sup>18</sup>, projets qui, entre autres, ont permis d'améliorer la représentation du progrès technique dans le modèle NEMESIS (Le Mouël *et al.*, 2016)<sup>19</sup>, en étendant les actifs d'innovation aux TIC et autres intangibles (logiciels et formation), en plus de la R & D.

---

<sup>14</sup> Jolly C., Liegey M., Passet O., Boitier B., Fougeyrollas A., Le Mouël P. et Zagamé P. (2012), *Les secteurs de la nouvelle croissance : une projection à l'horizon 2030*, Rapport du Centre d'analyse stratégique (CAS), Paris, La Documentation française, janvier.

<sup>15</sup> Velselkova M., van der Gaag N., Boitier B., Lancesseur N. et Zagamé P. (2014), « How much work will there be? Where is it going to come from? », Chapter 3 in Beblavy M., Maselli I. et Veselkova M., *Let's Get to Work! The future of labour in Europe*, vol. I.

<sup>16</sup> Boitier B., Fougeyrollas A., Lancesseur N., Le Hir B., Le Mouël P. et Zagamé P. (2016), « FLAGSHIP scenarios: Two long-run perspectives of the European Economy », FLAGSHIP Deliverable D4.2, janvier.

<sup>17</sup> Gros D., Alcidi C., Berhens A., Blockmans S., Busse M., Egenhofer C., Fontagné L., Fougeyrollas A., Koleda G., Maselli I., Ramos P.A., Sessa C. et Zagamé P. (2013), « The Global Economy in 2030 : Trends and strategies for Europe », *CEPS Paperbacks*.

<sup>18</sup> [simpatic.eu](http://simpatic.eu), [www.i3u-innovationunion.eu](http://www.i3u-innovationunion.eu).

<sup>19</sup> Le Mouël P., Le Hir B., Fougeyrollas A., Zagamé P. et and Boitier B. (2016), « *Toward a macro-modelling of European Innovation Union: The contribution of NEMESIS model* », paper presented at the 9th Conference on Model-based Evidence on Innovation and DEvelopment (MEIDE) the 16-17 June 2016 in Moscow, Russia.





## COMPLÉMENT 11

# LE MODÈLE THREE-ME

---

Gaël Callonnec, Raphaël Cancé et Aurélien Saussay<sup>1</sup>

Le modèle Three-ME, modèle macroéconomique multisectoriel d'évaluation des politiques énergétique et environnementale, développé depuis 2008 par l'OFCE et l'ADEME, et co-mobilisé par le ministère de la Transition énergétique et solidaire depuis 2013, est un modèle d'équilibre général calculable néokeynesien au sens où la dynamique des prix et de l'offre de monnaie rend compte de déséquilibres transitoires sur les marchés et notamment le marché du travail. C'est un modèle hybride au sens où sont conciliées une approche top-down classique et une approche bottom-up qui consiste à donner un fondement microéconomique aux décisions des ménages quant à la consommation énergétique, la rénovation thermique et l'achat de logements et de véhicules.

### 1. Description générale

Le modèle Three-ME est multi sectoriel : il comprend 24 secteurs économiques (agriculture, sidérurgie, production d'énergie, transport ferroviaire, services non marchands, etc.), ce qui permet d'analyser les effets des transferts d'activité d'un secteur à un autre (en termes d'emploi, d'investissement, d'importations, etc.). Enfin, en particulier, le modèle Three-ME considère quatre facteurs de production (le capital, le travail, les consommations intermédiaires et l'énergie) et 17 types d'énergies potentiellement substituables entre elles.

Le modèle comprend 14 000 équations et 70 000 paramètres. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

---

<sup>1</sup> OFCE (Observatoire français des conjonctures économiques).

## 2. La détermination des prix

Le modèle est d'inspiration néokeynésienne. À la différence des modèles walrassiens, les prix ne s'ajustent pas instantanément pour équilibrer l'offre et la demande sur les marchés.

- **Sur le marché des biens**, le prix notionnel est obtenu en appliquant un taux de marge sur les coûts unitaires de production (théorie du mark-up). Les marges elles-mêmes dépendent de la variation de la demande en volume adressée aux entreprises.
- **Sur le marché du travail**, le salaire n'ajuste pas instantanément l'offre et la demande d'emploi. Il peut donc exister un équilibre de sous-emploi chronique et du chômage involontaire. Le salaire est déterminé par une courbe Wage-Setting. Elle suppose que la rémunération du travail dépend du pouvoir de négociation des salariés qui dépend du taux d'inflation, de l'évolution du taux de chômage et de la productivité du travail.
- **Sur le marché du capital**, les taux d'intérêts n'équilibrent pas instantanément l'épargne et l'investissement car il est supposé que les investissements peuvent être non seulement financés par l'épargne mais aussi par des crédits bancaires, autrement dit par de la création monétaire. Cette caractéristique limite le traditionnel effet d'éviction que l'on trouve dans les modèles walrassiens où pour un montant donné d'épargne, la hausse des investissements des uns est financée au détriment des autres. Les taux d'intérêt sont fixés par les autorités monétaires en fonction de l'évolution de l'inflation et de l'activité économique (règle de Taylor). Dans cet exercice, il a été supposé que le taux d'intérêt réel resterait fixe. Implicitement l'offre de monnaie s'ajuste à la demande de monnaie en fonction de la valeur du taux d'intérêt.

Puisque l'investissement n'est pas prédéterminé par la quantité d'épargne disponible, il dépend de la demande effective de biens adressée aux entreprises et du coût du capital. Ainsi lorsque l'épargne des ménages augmente, la consommation diminue, la production s'y ajuste et l'activité économique ralentit, jusqu'à ce que l'épargne sociale (égale aux profits des entreprises, leur amortissement, et l'épargne des ménages) soit égale aux montants investis. Contrairement aux modèles walrassiens, il existe donc une contrainte de débouchés (l'épargne est une fuite). À l'inverse, une politique monétaire et ou budgétaire expansive engendre une hausse de l'investissement qui entraîne une augmentation des revenus et de l'épargne.

Ainsi, lorsque l'investissement dépend de la demande, la monnaie n'est pas neutre. Une expansion de l'offre de crédit et/ou une baisse des taux engendrent une hausse

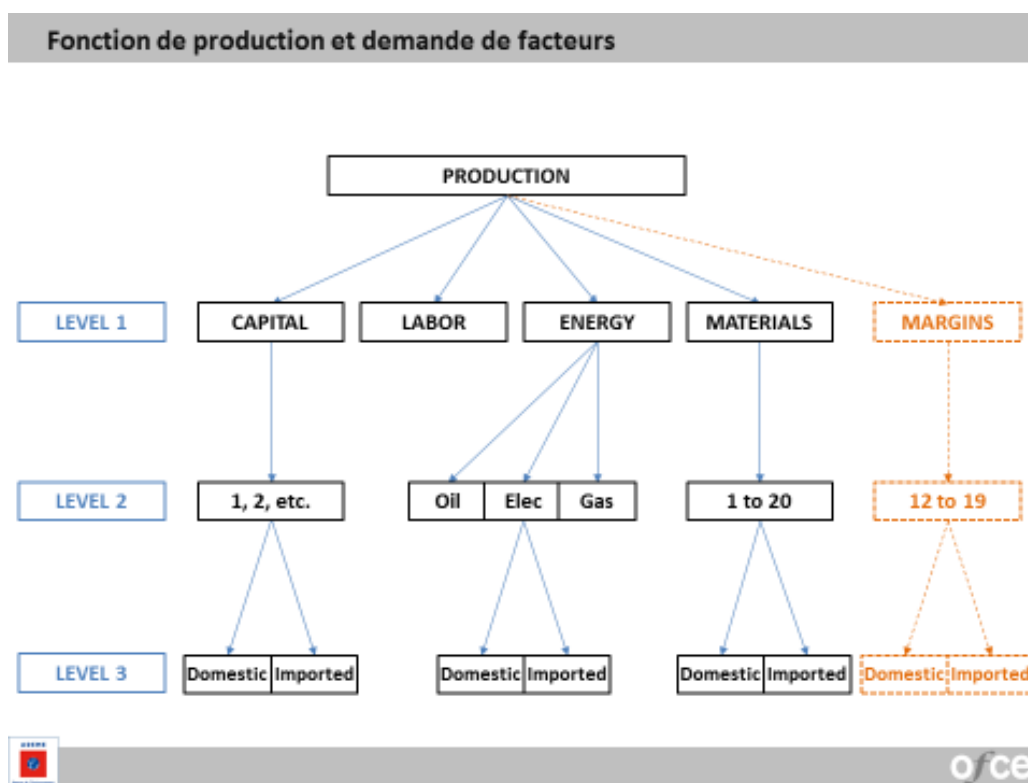
cumulative de l'activité. On parle de multiplicateur d'investissement et de multiplicateur du crédit.

### 3. Le bouclage macroéconomique

Puisque l'investissement dépend de la demande anticipée, l'offre s'ajuste à la demande, qui elle-même fluctue en fonction des prix et des salaires.

- **La demande des facteurs de production**, capital, emploi, énergie et consommations intermédiaires, dépend de la demande anticipée et de leurs prix relatifs.

Elle est déterminée à partir d'une de fonction CES (*Constant Elasticity of Substitution*) « généralisée ». Ainsi, les entreprises satisfont la demande tout en minimisant leurs coûts. Elles peuvent substituer les facteurs de production entre eux. Elles peuvent modifier leur mix énergétique et leur propension à importer.



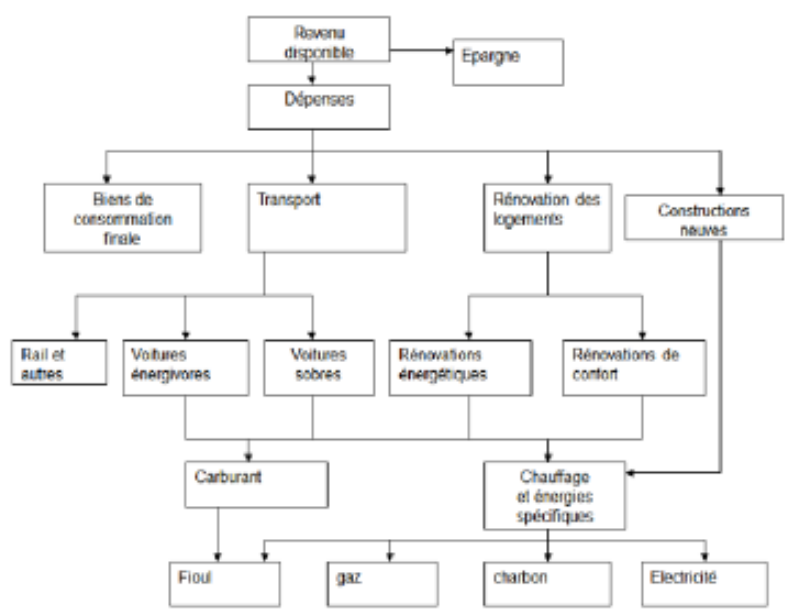
- **La fonction de consommation**

La consommation des ménages dépend de l'évolution de leurs revenus réels (revenus du travail, revenus sociaux, transferts financiers), net des taxes et de leur

propension à épargner (l'épargne elle-même dépend du niveau de leurs revenus et des taux d'intérêt réels).

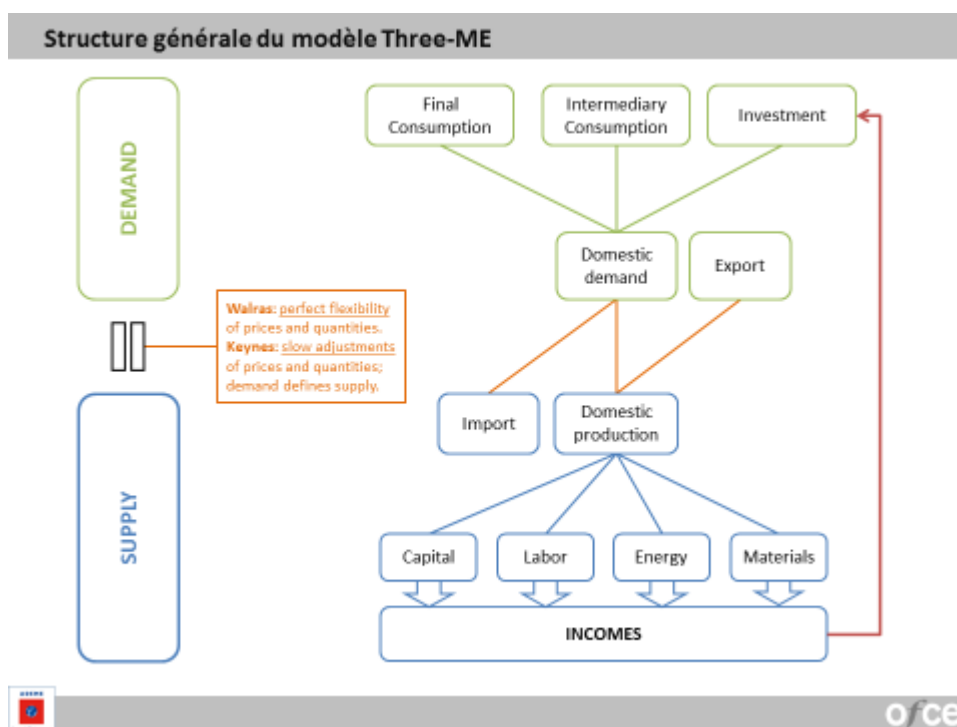
La consommation de biens est égale au revenu moins l'épargne, duquel sont retranchées les dépenses dites incompressibles comme les mensualités des emprunts liés aux travaux immobiliers et l'achat de véhicules (voir *infra*) et les factures énergétiques. La composition du panier de biens de consommation est modélisée à travers une fonction d'utilité de type *Linear Expenditure System* (LES) généralisée qui rend possible la substitution entre produits et services en fonction de leurs prix relatifs.

### Les dépenses des ménages dans Three-ME



- **Le commerce extérieur** : Three-ME est un modèle en économie ouverte. Le reste du monde est représenté de façon agrégée. Les importations et les exportations évoluent en fonction de la demande et des distorsions entre les prix domestiques et les prix étrangers, supposés exogènes (voir Harmington).
- **L'État** : ses dépenses varient de façon exogène. On suppose qu'elles augmentent en fonction du taux de croissance démographique, augmenté du taux de croissance de la productivité du travail. Ses dépenses sociales dépendent également du niveau du chômage. Les politiques publiques, notamment fiscales, sont exogènes.





Le modèle a été calibré et paramétré de façon à reproduire les propriétés dynamiques du modèle de prévision MESANGE développé par le ministère des finances.

Des tests de sensibilité ont été réalisés pour obtenir les mêmes résultats macroéconomiques identiques à ceux qui ont été publiés par le Trésor à court, moyen et long terme<sup>2</sup>.

## 4. Le module énergie-environnement

### L'offre d'énergie

L'offre d'énergie dépend du niveau de la demande. La composition du mix énergétique est exogène. La part des différents vecteurs et modes de production dans le mix énergétique est exogène. Par exemple, la part de la production d'électricité d'origine nucléaire est déterminée par l'État.

<sup>2</sup> Voir Callonnec G., Landa G., Malliet P., Reynès F. et Saussay A. (2016), « Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME : un cahier de variantes », *Revue de l'OFCE*, 149 ; Dufernez A.-S., Elezaar C., Leblanc P., Masson E. et al. (2017), « Le modèle macroéconométrique Mésange : réestimation et nouveautés », *Documents de travail de la DG Trésor*, n° 2017/04, mai.

### Les secteurs énergétiques de Three-ME

Coal	Mining of coal and lignite
Refined petroleum products	Oil
	Biofuels
Electric power generation, transmission and distribution	Nuclear
	Fuel
	Combined gas
	Coal
	Wind
	Solar
	Hydraulic
Manufacture and distribution of gas	Cogeneration (Combined Heat and Power, CHP)
	Natural gas
	Wood
	Biogas
	Waste incineration
	Geothermal
	Cogeneration (Combined Heat and Power, CHP)



### La demande d'énergie

Le modèle Three-ME est un modèle hybride. La consommation d'énergie n'est pas déterminée par une relation économétrique. Les consommations intermédiaires d'énergie dans les secteurs productifs dépendent de la production et des possibilités de substitution entre le capital et l'énergie qui dépendent elles-mêmes des distorsions de leurs prix relatifs (voir Théorie CES).

Les entrepreneurs peuvent substituer les sources énergétiques entre elles (électricité, produits pétroliers, gaz) en fonction de leurs prix relatifs.

La demande d'énergie des ménages dépend de l'évolution de leur stock de bâtiments et de véhicules et de leurs performances énergétiques respectives. Elle est considérée comme un « bien complémentaire ».

La demande de véhicules dépend de la demande de mobilité qui elle-même évolue en fonction de leurs revenus et des coûts relatifs des transports. Un report modal entre les divers modes de transports (rail, route, etc.) est possible.

Une fois que la demande de véhicules est déterminée, les ménages choisissent leurs voitures en fonction d'un arbitrage qui dépend de leurs coûts d'usage relatifs (qui comprennent : la valeur de la consommation d'énergie, les coûts d'achat nets des subventions et d'entretien annualisés).

Les ménages font d'abord un arbitrage entre véhicules thermiques et véhicules électriques en fonction de leurs coûts d'usage relatifs mais aussi d'effets dynamiques dans le cadre d'un modèle d'innovation/diffusion dit de « Bass » (1969).

Ensuite ils choisissent la classe énergétique des véhicules thermiques en fonction de l'évolution du prix de l'énergie, de leurs coûts d'achats nets des taxes et subventions.

Le bloc automobile a été calibré et paramétré de manière à reproduire ex post l'évolution constatée des différentes parts de marché des classes énergétiques de véhicules sur la période 2006-2015.

La consommation énergétique du résidentiel dépend du stock et des performances énergétiques du parc immobilier. Les constructions neuves dépendent du taux de croissance démographique et de l'évolution du nombre de mètres carrés par habitant anticipé par l'Insee

Les ménages peuvent réaliser des travaux de rénovation énergétique de façon à faire basculer leur logement d'une classe énergétique à l'autre en fonction du coût des travaux et du prix de l'énergie. Il existe 7 classes énergétiques de bâtiments. Lorsque la valeur actuelle nette des travaux de rénovation s'accroît les investissements augmentent.

Le bloc logement a été calibré pour reproduire l'évolution des diverses classes énergétiques de bâtiment, leurs consommations énergétiques, le nombre et le coût des travaux d'isolation, ainsi que le montant des crédits d'impôts versés sur la même période.

Il existe également un effet de sobriété : la demande des agents diminue lorsque le prix de l'énergie augmente. A titre d'exemple : lorsque le prix des carburants monte, les véhicules parcourent moins de kilomètres et le covoiturage se développe.

## Références

Le modèle Three-ME est conjointement utilisé par l'ADEME, l'OFCE, le CGDD et l'AFD pour simuler les effets économiques des scénarios de transition énergétique et des mesures réglementaires d'efficacité énergétique et ou de fiscalité environnementale.

Le modèle a été utilisé pour estimer les effets macroéconomiques des visions de l'ADEME en 2013, de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte en 2014, de la Stratégie nationale bas carbone et de la Programmation pluriannuelle de l'État en 2016 et 2018.

ADEME (2012), *Contribution de l'ADEME à l'élaboration des visions énergétiques 2030-2050*, Rapport, juin, 46 p.

Baiz A. et Callonnec G. (2016), « La SNBC, une évaluation macroéconomique », Thema, MEEM, CGDD, septembre.

Boitier B., Callonnec G., Douillard P., Epaulard 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. 32 p.

Callonnec G. (2014), « Estimation des effets macroéconomiques du Projet de loi sur la transition énergétique », note ADEME/DESRI/DRP/SEP à destination du cabinet de la ministre de l'Écologie et de l'Énergie, juin, 2 p.

Callonnec G. (2014), « Estimation des effets macroéconomiques du Projet de modification de la directive 2003/96 CE sur les taxes énergétiques », note ADEME/DESRI/DRP/SEP à destination du la commission des finances du Sénat, juin, 13 p.

Callonnec G., Landa G., Malliet P., Reynès F. et Saussay A. (2016) « Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle Three-ME : un cahier de variantes », *Revue de l'OFCE*, 149.

Callonnec G. (2016), « Financer la transition bas carbone », *ADEME et vous, La lettre stratégie*, n° 49, juin, 9 p.

Callonnec G., Cancé R. et Saussay A. (2018), « La valeur tutélaire du CO<sub>2</sub> pour la neutralité carbone en 2050 », Note CGDD - ADEME – OFCE, juin, 20 p.

Callonnec G., Landa G. et Maillet P. (2013), « Estimation des effets macroéconomiques de la vision ADEME », note ADEME/DESRI/DRP/SEP pour le Débat national sur la transition énergétique, 11 juillet, 44 p.

Callonnec G., Landa G. et Maillet P. (2013), « Évaluation macro-économique des impacts des scénarios de transition énergétique DIV et EFF avec le modèle Three-ME de l'ADEME et de l'OFCE », note ADEME/DESRI/DRP/SEP, à l'intention du Premier ministre, 10 septembre, 12 p.

Callonnec G., Landa G., Maillet P. et Reynes F. (2013), « Les effets macroéconomiques des scénarios énergétiques de l'ADEME », *Revue de l'Énergie*, n° 615, octobre, p 344-359.

Callonnec G., Landa G., Maillet P., Reynes F. et Yeddir Tamsamani Y. (2013). « [A full description of the Three-ME model: Multi-sector macroeconomic model for the evaluation of environmental and energy policy](#) », OFCE.

Callonnec G. et Weber Haddad V. (2017), « La fiscalité environnementale : un levier pour atteindre les objectifs environnementaux de la France », *ADEME et vous, La lettre stratégie*, n° 53, mars, 10 p.

Dufernez A.-S., ELezaar C., Leblanc P. et Masson E. *et al.* (2017), « Le modèle macroéconométrique Mésange : réestimation et nouveautés », *Documents de travail de la DG Trésor*, n° 2017/04, mai, 148 p.

Nauleau M.-L., Callonnec G. et Quirion P. (2014), « MENFIS, an energy-economy model to assess energy savings policies in the French residential sector », *Working Paper*.





## COMPLÉMENT 12

# VALEUR TUTÉLAIRE DU CARBONE ET ENVIRONNEMENT INTERNATIONAL DE DÉCARBONATION

---

Patrick Criqui<sup>1</sup>

Les premiers éléments collectés ici visent à caractériser l'ampleur des impacts potentiels des scénarios internationaux sur la valeur tutélaire du carbone (VTC), dans une perspective de neutralité carbone en 2050 pour la France.

Le point de départ est constitué par l'analyse selon laquelle le contexte international de décarbonation ambitieux pourrait avoir un triple impact potentiel :

- à la hausse de la VTC en France puisqu'il entraînerait une baisse relative (par rapport aux scénarios moins ambitieux) des prix des énergies fossiles et en particulier du pétrole ;
- à la baisse de la VTC puisqu'un scénario ambitieux devrait conduire à une plus forte diffusion des technologies bas carbone, donc à une baisse de leur coût par prise en compte des effets d'expérience (*learning by doing*) et du *learning rate* (LR) associé (baisse de coût pour chaque doublement du nombre cumulé d'équipements produits, typiquement comprise entre 10 % et 30 %) ;
- également à la baisse de la VTC puisqu'un effort international accru de R & D est susceptible de faire apparaître des effets de « *learning by searching* », que la littérature a du mal à quantifier, mais dont on peut approcher les effets par l'adoption d'un *learning rate* plus élevé.

---

<sup>1</sup> Directeur de recherche émérite au CNRS.

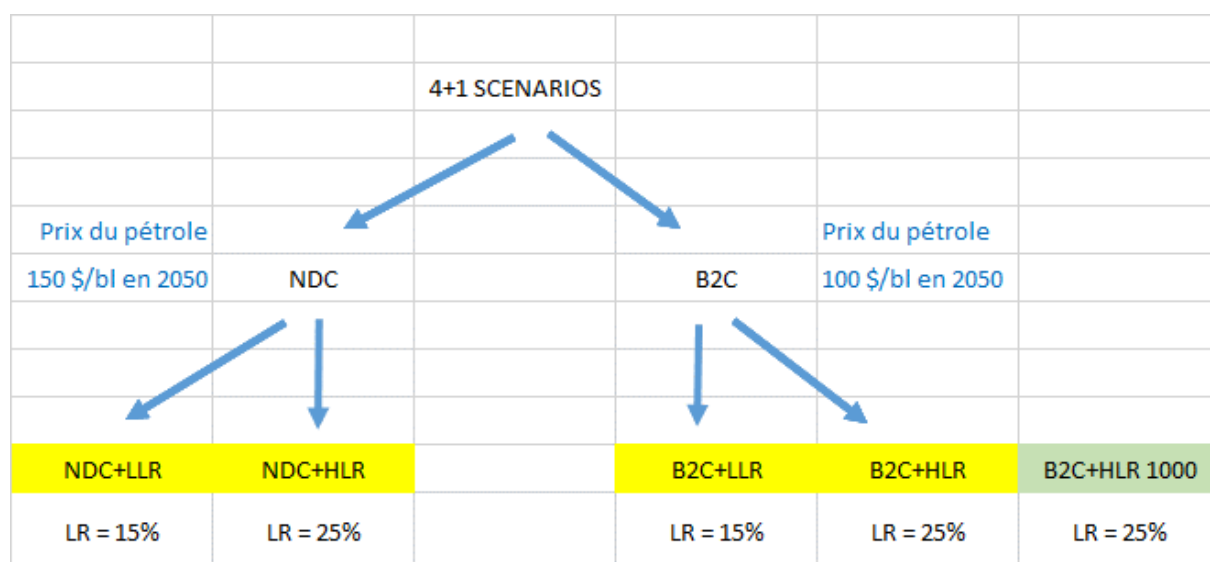
L'évaluation modélisée des impacts de l'ensemble de ces phénomènes sur la VTC en France paraît aujourd'hui largement hors de portée. En revanche, il semble possible de mener des études de sensibilité à partir de différents scénarios et pour des technologies sensibles à ce type d'impacts et représentant des cas d'étude d'innovation incrémentale ou de rupture.

Le secteur des transports avec trois technologies concurrentes à terme – véhicule à moteur à combustion interne (ICE), véhicule électrique à batterie (BEV), véhicule à pile à combustible hydrogène (FCEV) – fournit un terrain favorable à ce type d'étude.

Pour ce faire nous avons rassemblé un ensemble d'éléments technico-économiques sur chacune des trois technologies et nous les avons testés sur quatre (plus un) scénarios de contexte international. Les quatre scénarios découlent du croisement :

- de deux hypothèses de politiques climatiques au plan mondial – NDC pour *Nationally Determined Contributions* (ou EnerBlue d'Enerdata) et B2C pour *Below 2 °C* (ou EnerGreen d'Enerdata) ;
- et de deux hypothèses contrastées sur la diffusion et les LR pour les véhicules alternatifs – LLR pour *Low Learning Rate* et HLR pour *High Learning Rate*.

Alors que la valeur du carbone utilisée dans ces scénarios reflète les estimations de la commission Quinet 1 (100€/tCO<sub>2</sub> en 2030 et 250€/tCO<sub>2</sub> en 2050), le cinquième scénario est une variante construite avec une hypothèse beaucoup plus élevée (200€/tCO<sub>2</sub> en 2030 et 1000€/tCO<sub>2</sub> en 2050).



La logique qui préside à l'utilisation de ces scénarios (le *story telling*) est la suivante :



- la décarbonation des transports est une dimension stratégique de la transition est c'est dans ce secteur que l'on trouve les coûts marginaux d'abattement les plus élevés pour la décarbonation profonde ;
- au-delà de toutes les mesures d'aménagement de l'espace et de promotion des nouvelles pratiques de transport, la décarbonation rapide des flottes de véhicules automobiles est un impératif ;
- dans cette perspective, le véhicule électrique à batterie constitue une option assez mature, dans laquelle on peut attendre des progrès incrémentaux mais significatifs ;
- le développement du véhicule hydrogène constituerait une rupture car elle lèverait certaines des barrières à la généralisation des véhicules à batterie (autonomie, temps de recharge, poids, matériaux, etc.) ;
- cette dernière option pourrait devenir d'autant plus stratégique que des scénarios très ambitieux avec beaucoup de renouvelables (dans le monde encore plus qu'en France) nécessiteront de trouver des solutions massives au problème du stockage ; on pourrait dans cette situation disposer d'hydrogène à faible coût, à certains moments de l'année...

On est donc fondé à explorer les conditions de développement d'une hypothèse du véhicule à pile à combustible hydrogène comme à la fois centrale et représentative des innovations radicales qui devront être mobilisées dans les schémas de décarbonation profonde ou de neutralité carbone.

\* \* \*

À ce stade préliminaire, l'analyse des scénarios ne permet pas de répondre directement à la question : quels impacts du contexte international sur les innovations sur la VTC ? Mais elle fournit des premiers éléments d'appréciation des impacts relatifs des différents effets en s'appuyant sur des variables technico-économiques robustes ou du moins reflétant l'état des connaissances actuel. Cette note est donc éminemment provisoire et ne vise qu'à fournir du « food for thought » pour des travaux et réflexions ultérieures.

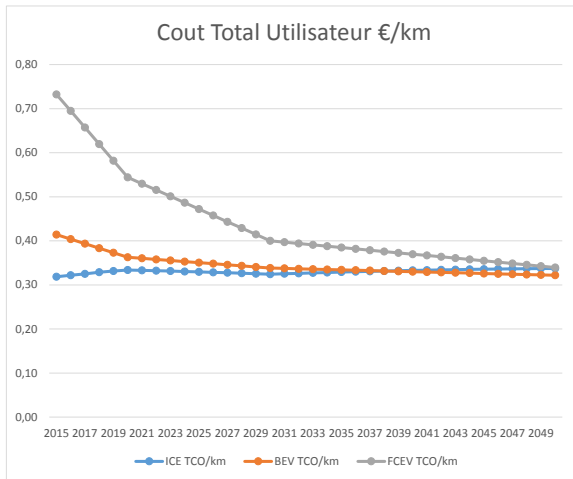
Les calculs et résultats préliminaires sont contenus dans le tableur « 040818\_VTC et scen ». Les trois tableaux suivants résument l'information pour le cas de base NDC+LLR.

**Tableau 1 – Comparaison des hypothèses et résultats de coût  
pour les trois types de véhicules :  
Scénario de base NDC+LLR**

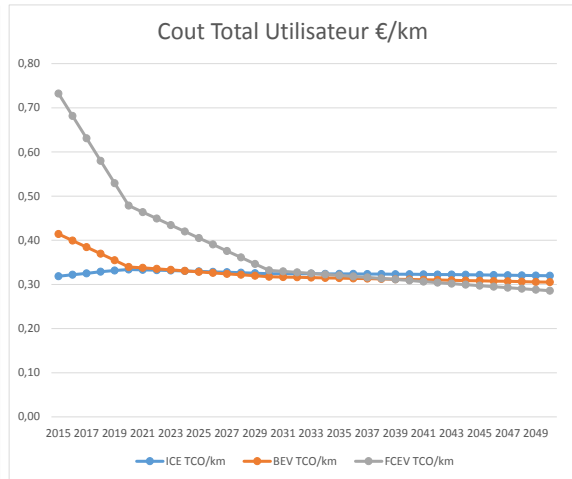
VTC	14,5	65	100	250
<b>ICE</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
Coût ICE	25 000	25 000	25 000	25 000
Facteur annuité (6% / 10 ans)	0,1358	0,1358	0,1358	0,1358
Annuité	3 395	3 395	3 395	3 395
Prix du pétrole	50	90	100	150
Prix Essence hors VTC	1,28	1,63	1,71	2,15
VTC	0,03625	0,1625	0,25	0,625
Conso ICE	7	6	5	4
km	15 000	15 000	15 000	15 000
Carburant hors VTC	1344	1467	1283	1290
VTC/an	38	146	188	375
TCO	4 777	5 008	4 865	5 060
ICE TCO/km	0,32	0,33	0,32	0,34
<b>BEV</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
N Vehicules (monde en M)	0,5	2,0	10	20
Cumul	0,5	7,5	72	377
Coût BEV	35 000	30 300	28 124	27 116
Facteur annuité (6% / 10 ans)	0,1358	0,1358	0,1358	0,1358
Annuité	4 753	4 115	3 819	3 682
Prix élec	0,15	0,20	0,25	0,25
Conso VEL	12,0	10,0	8,0	6,0
km	12 000	12 000	12 000	12 000
Elec	216	240	240	180
TCO	4 969	4 355	4 059	3 862
BEV TCO/km	0,41	0,36	0,34	0,32
<b>FCEV</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2050</b>
N Vehicules (monde en M)	0,5	0,5	10	20
Cumul	0,5	3,0	60	365
Coût FCEV	65 000	51 279	38 006	33 524
Facteur annuité (6% / 10 ans)	0,1358	0,1358	0,1358	0,1358
Annuité	8 827	6 964	5 161	4 553
Prix H2	12,0	10,0	8,0	6,0
Conso FCEV	1,20	0,80	0,70	0,60
km	15 000	15 000	15 000	15 000
H2	2 160	1 200	840	540
TCO	10 987	8 164	6 001	5 093
FCEV TCO/km	0,73	0,54	0,40	0,34

### Graphiques 1-5 – Coût total pour l'utilisateur en €/km

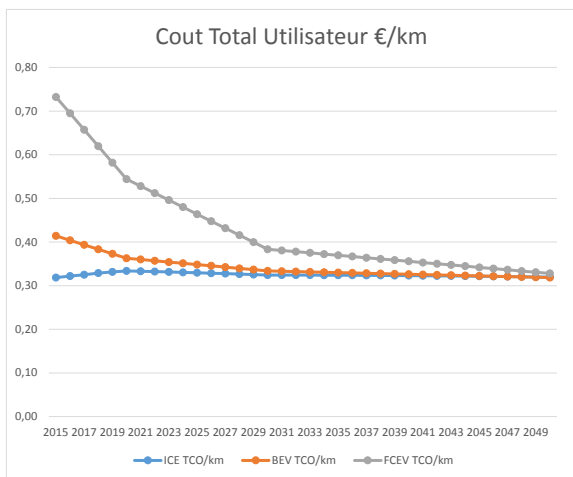
Graphique 1 – NDC + LLR



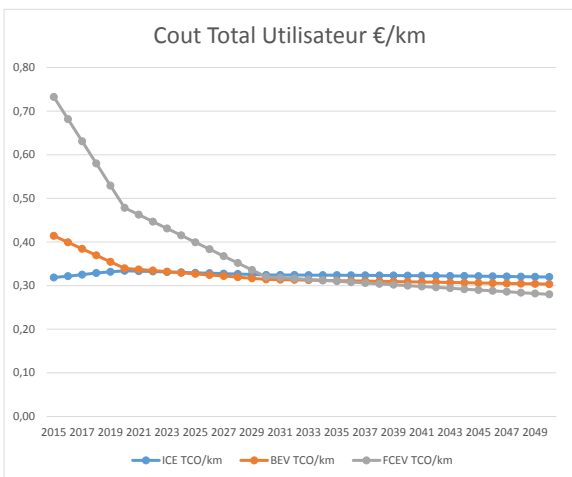
Graphique 2 – NDC + HLR



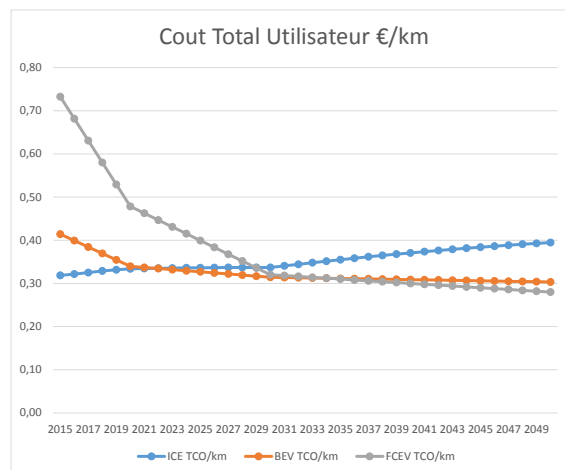
Graphique 3 – B2C + LLR



Graphique 4 – B2C + HLR



Graphique 5 – B2C + HLR 1000 (€/tCO<sub>2</sub> en 2050)



## Constats d'étape

- La simulation initiale NDC+LLR fait apparaître un coût total pour l'utilisateur (CTU) 2015 supérieur de 28 % pour le véhicule à batterie et plus de deux fois supérieur pour le véhicule à pile à combustible.
- En projection, le CTU du véhicule à batterie rejoint celui du véhicule conventionnel vers 2035, ce n'est le cas qu'en 2050 pour le véhicule à pile à combustible.
- De manière sans doute décevante, le scénario B2C+LLR ne change pas radicalement la situation car la plus large diffusion des véhicules alternatifs est pour partie compensée par la baisse des prix du pétrole (même si celle-ci ne correspond qu'à une baisse de 2 centimes d'euro pour un CTU initial de 34 centimes).
- En revanche, les scénarios avec LR élevé (25 % au lieu de 15 %) font apparaître des évolutions assez radicalement différentes et même dans le scénario NDC+HLR on constate la parité des CTU dès 2020 pour le BEV et 2030 pour le FCEV ; le CTU du FCEV rejoint celui BEV également vers 2030 ; le scénario B2C+HLR n'est que légèrement plus favorable car à nouveau les effets d'une plus large diffusion sont en partie compensés par un prix du pétrole plus faible.

Le résultat le plus significatif renvoie donc à l'importance des effets d'apprentissage dans l'ensemble des évolutions décrites. Il apparaît capital de pouvoir alimenter par une R & D appropriée des effets d'apprentissage élevés pour les véhicules alternatifs. C'est l'une des clés du succès.

Une conclusion à ne pas tirer serait de considérer que l'environnement international – NDC ou B2C – n'a finalement pas beaucoup d'importance. Ce serait en effet une erreur car il apparaît assez évident que les effets d'apprentissage se faisant à l'échelle mondiale pour l'industrie automobile, la probabilité de LR élevés est probablement fortement corrélée à l'ambition des politiques poursuivies hors de France (de ce point de vue le scénario NDC+HLR est assez peu probable).

Enfin, la variante VTC 1 000 € en 2050 est intéressante en ce sens que, si elle affecte peu le CTU des véhicules alternatifs, c'est le seul cas dans lequel le coût du véhicule ICE augmente fortement sur la période. Dans tous les autres cas, en effet, l'augmentation du pétrole est en bonne partie compensée par les gains de consommation par amélioration prévue des moteurs.

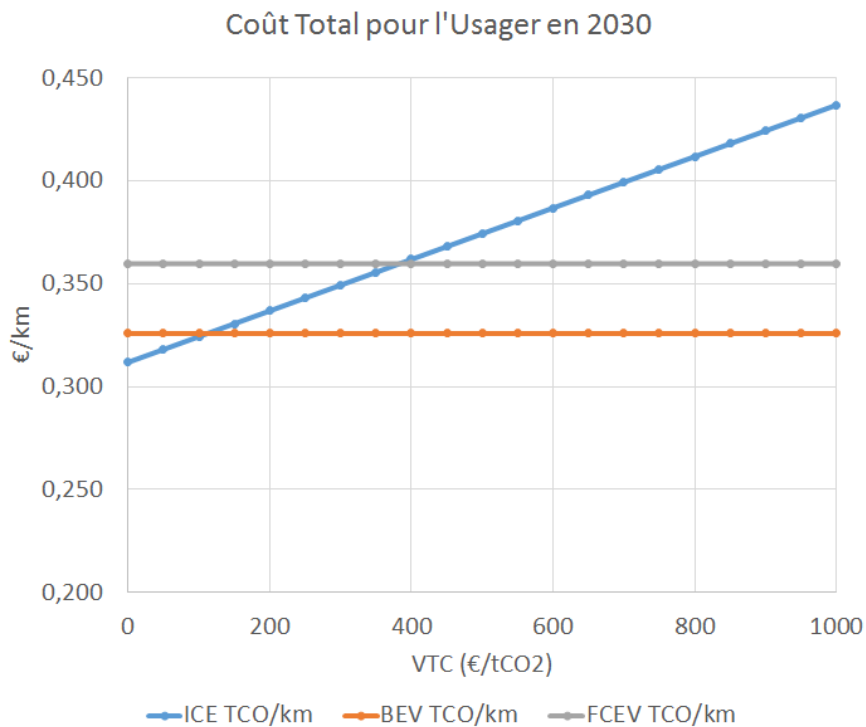
Les simulations ouvrent enfin sur une question stratégique : si les perspectives des véhicules alternatifs apparaissent globalement positives sur le long terme, comment assurer la traversée de la vallée de la mort jusqu'en 2030, alors que les CTU resteront beaucoup plus élevés pour les utilisateurs (et qui prendra en charge les coûts) ?

Cela renvoie évidemment à la question des instruments et de la manière dont devront être articulés normes et VTC...

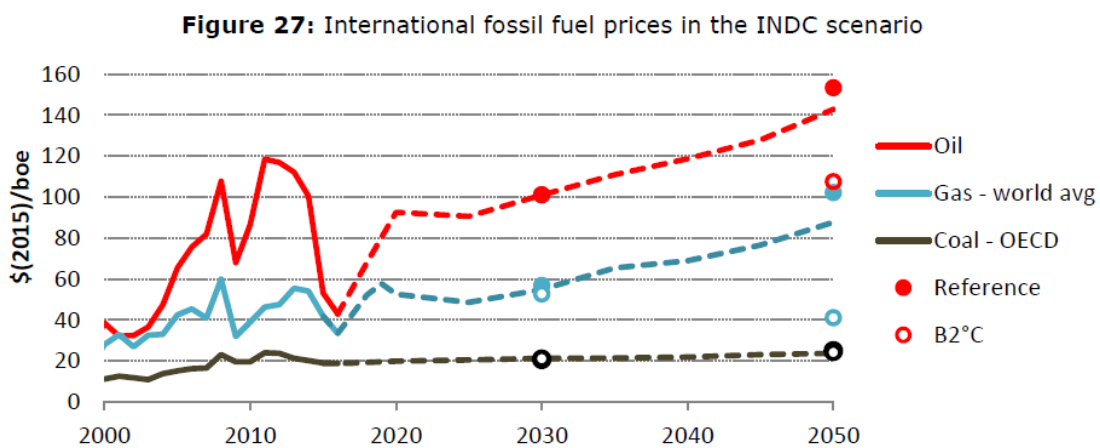
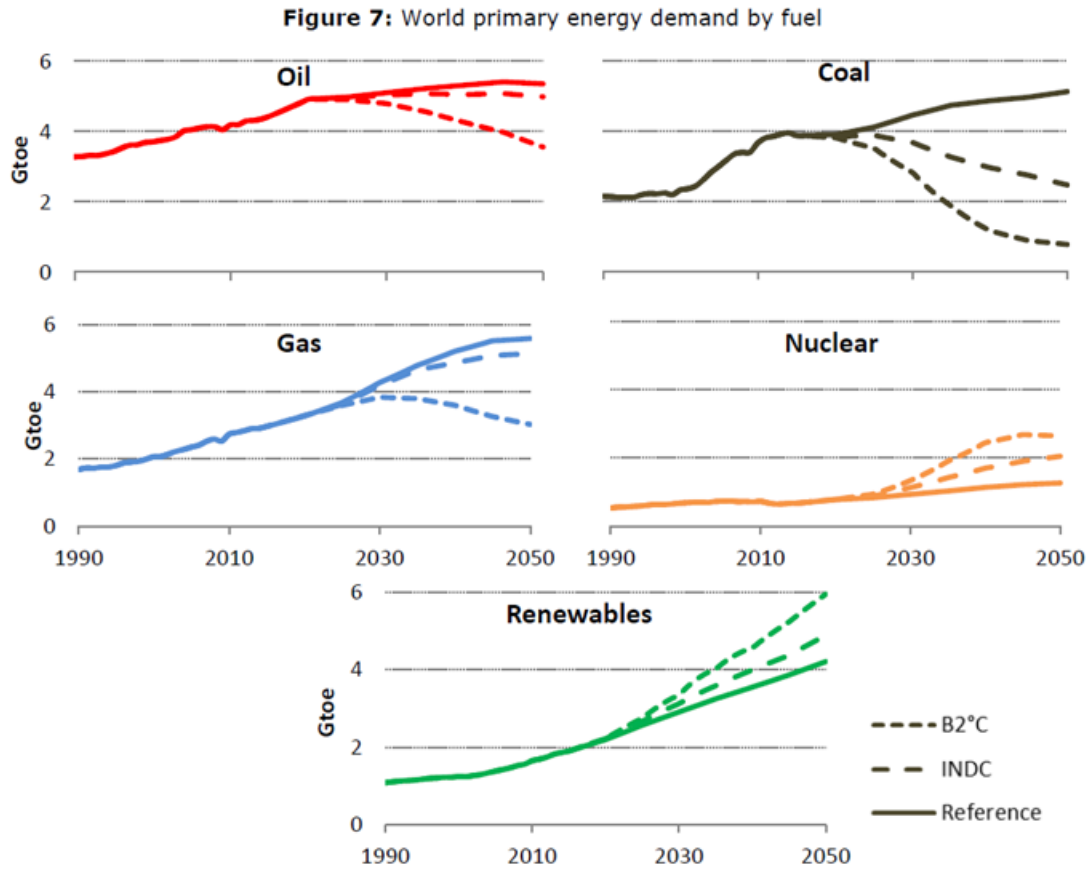
### Complément : Test de la sensibilité à la valeur du carbone à horizon 2030

On reprend ici les mêmes hypothèses que *supra* pour la situation en 2030, mais en faisant varier la valeur du carbone pour le véhicule ICE, mais :

- on retient une hypothèse moyenne pour le *learning*, c'est-à-dire 20 % ;
- et l'on suppose que l'électricité et l'hydrogène sont 100 % « zéro carbone » donc insensibles à l'augmentation de la VTC.



## Annexe 1 : Demande et prix des énergies dans l'étude JRC-IPTS GECO 2017 (modèle POLES)



## Annexe 2 : Courbes d'apprentissage, Progress Ratio et Learning Rate

$$\log C_t = a - b \log X_t$$

$$C_t = \text{const} \cdot X^{-b}$$

$$C_t = C_0 \left( \frac{X_t}{X_0} \right)^{-b}$$

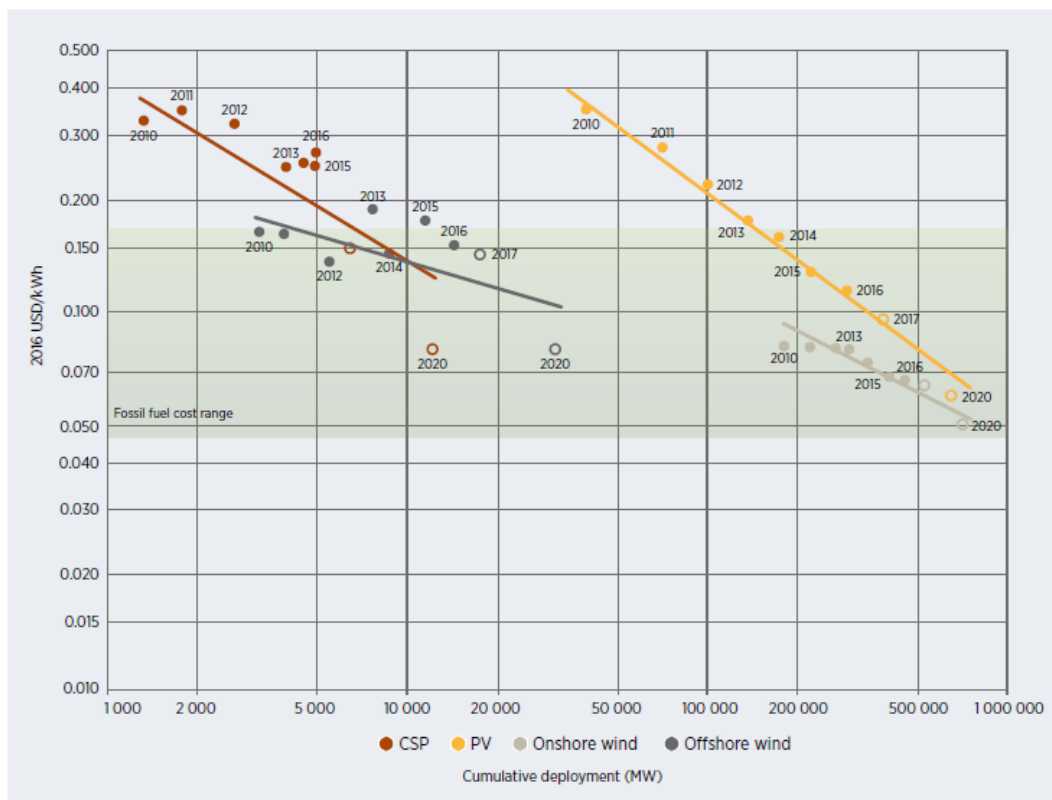
(PR) and the Learning Rate (LR)

$$PR = \frac{C_t}{C_0} = \left( \frac{2X_0}{X_0} \right)^{-b}$$

$$PR = 2^{-b}$$

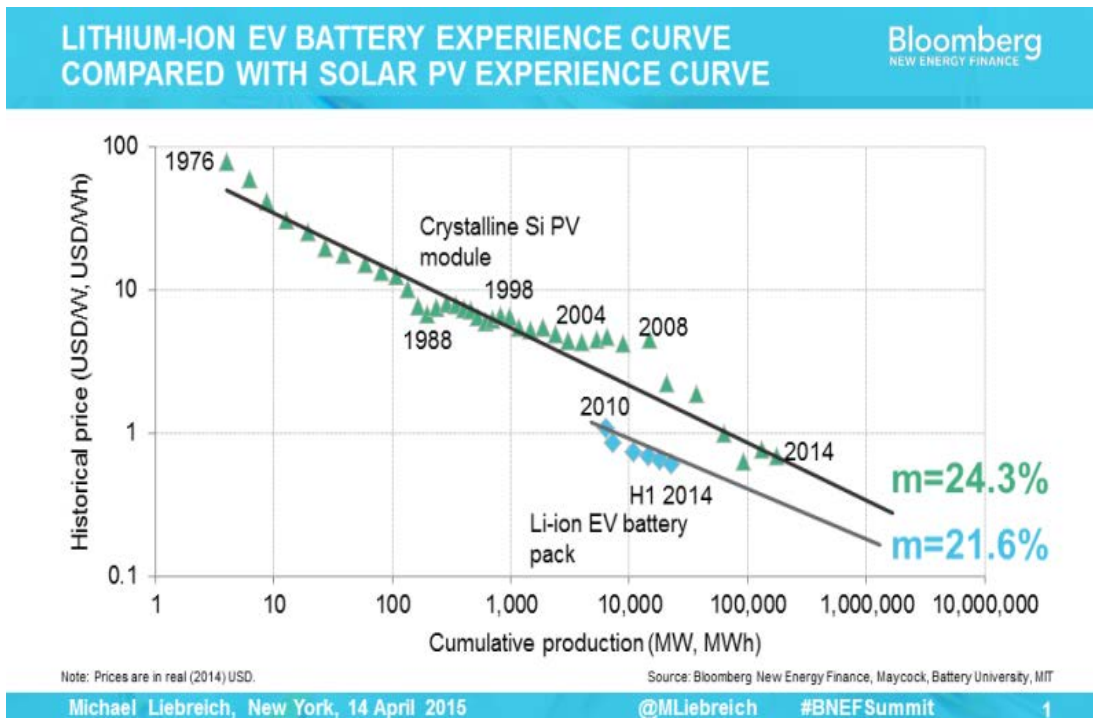
$$LR = 1 - PR$$

**Figure 2.14** Global weighted average CSP, solar PV, onshore and offshore wind project LCOE data to 2017 and auction price data to 2020, 2010-2020



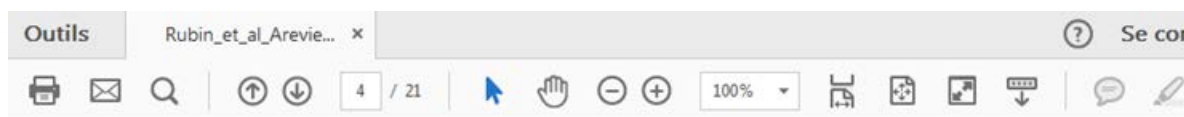
Based on IRENA Renewable Cost Database and Auctions Database; GWEC (2017), MAKE Consulting (2017a), SolarPower Europe (2017), and WindEurope (2017).

NB : il s'agit ci-dessus de LR sur le coût de production de l'énergie (gains d'efficacité et de productibilité inclus) et non sur les seuls coûts d'investissement ; les valeurs typiques de la littérature pour le LR des investissements éolien et solaire sont respectivement 15-20 % et 20-25 %.





### Tableau de synthèse pour la comparaison One and Two Factor Learning Curves (Rubin *et al.*)



**Table 1**  
Range of reported one-factor and two-factor learning rates for electric power generation technologies.

Technology and energy source	No. of studies with one factor <sup>a</sup>	No. of studies with two factors	One-factor models <sup>b</sup>		Two-factor models <sup>c</sup>				Years covered across all studies
			Range of learning rates	Mean LR	Range of rates for LBD	Mean LBD rate	Range of rates for LBR	Mean LBR rate	
Coal									
PC	4	0	5.6–12%	8.3%	–	–	–	–	1902–2006
PC+CCS <sup>d</sup>	2	0	1.1–9.9% <sup>d</sup>		–	–	–	–	Projections
IGCC <sup>d</sup>	2	0	2.5–16% <sup>d</sup>		–	–	–	–	Projections
IGCC+CCS <sup>d</sup>	2	0	2.5–20% <sup>d</sup>		–	–	–	–	Projections
Natural gas									
NGCC	5	1	–11 to 34%	14%	0.7–2.2%	1.4%	2.4–17.7%	10%	1980–1998
Gas turbine	11	0	10–22%	15%	–	–	–	–	1958–1990
NGCC+CCS <sup>d</sup>	1	0	2–7% <sup>d</sup>		–	–	–	–	Projections
Nuclear	4	0	Negative to 6%	–	–	–	–	–	1972–1996
Wind									
Onshore	12	6	–11 to 32%	12%	3.1–13.1%	9.6%	10–26.8%	16.5%	1979–2010
Offshore	2	1	5–19%	12%	1%	1%	4.9%	4.9%	1985–2001
Solar PV	13	3	10–47%	23%	14–32%	18%	10–14.3%	12%	1959–2011
Biomass									
Power generation <sup>e</sup>	2	0	0–24%	11%	–	–	–	–	1976–2005
Biomass production	3	0	20–45%	32%	–	–	–	–	1971–2006
Geothermal <sup>f</sup>	0	0	–	–	–	–	–	–	
Hydroelectric	1	1	1.4%	1.4%	0.5–11.4%	6%	2.6–20.6%	11.6%	1980–2001

<sup>a</sup> Some studies report multiple values based on different datasets, regions, or assumptions.

<sup>b</sup> LR=learning rate. Values in italics reflect model estimates, not empirical data.

<sup>c</sup> LBD=learning by doing; LBR=learning by researching.

<sup>d</sup> No historical data for this technology. Values are projected learning rates based on different assumptions.

<sup>e</sup> Includes combined heat and power (CHP) systems and biodigesters.

<sup>f</sup> Several studies reviewed presented data on cost reductions but did not report learning rates.

### Annexe 3 : Dépenses publiques de R & D-Énergie dans l'OCDE

Figure 1: IEA member countries total public energy RD&D budget

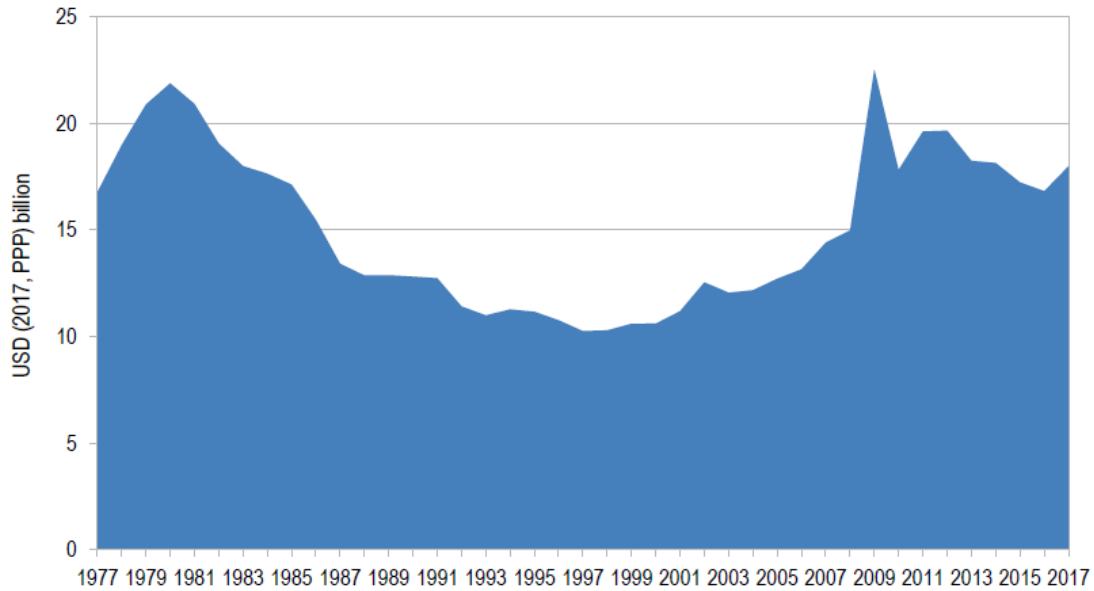
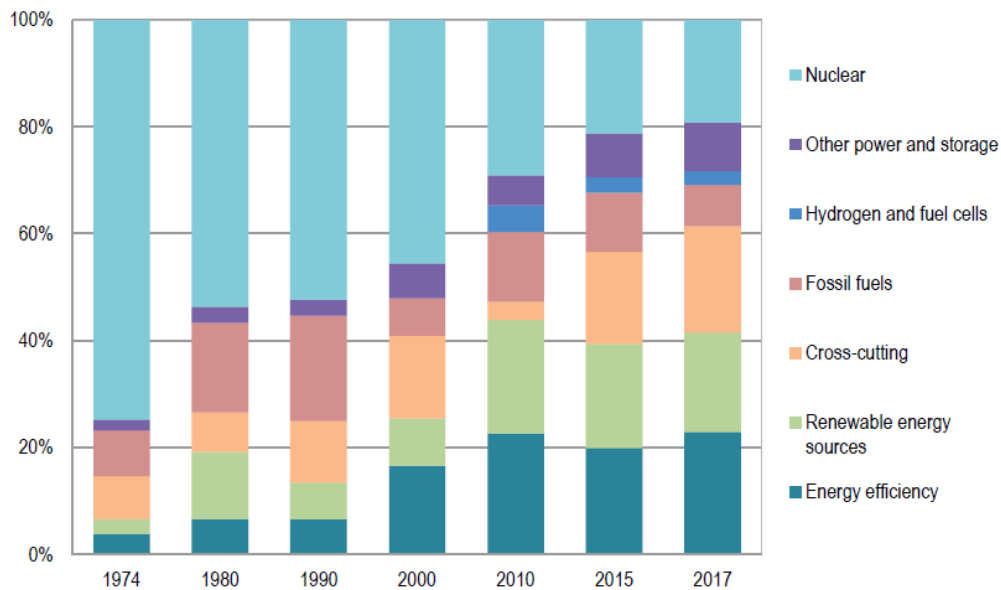


Figure 2: Evolution of IEA member countries total public energy RD&D by technology



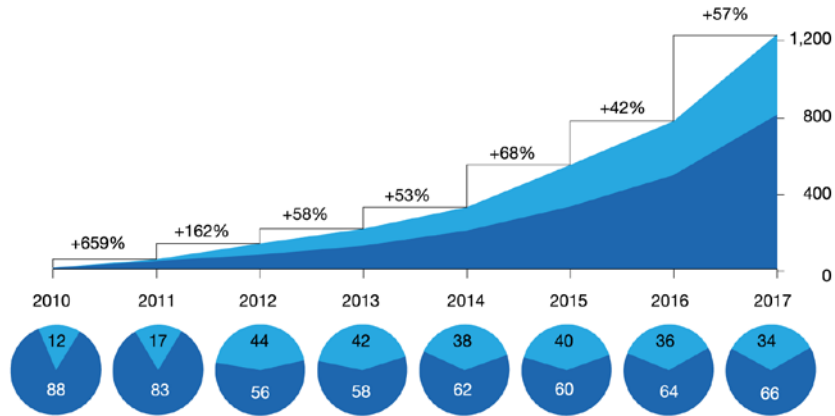
## Annexe 4 : Éléments de cadrage pour les véhicules électriques à batterie BEV



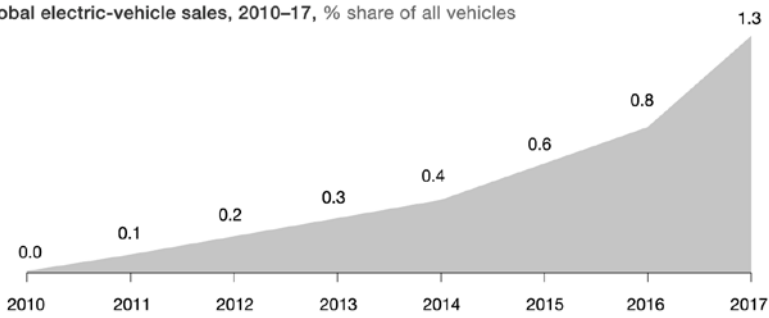
Last year, for the first time, global sales of new electric vehicles passed a million units.

■ Plug-in hybrid-electric vehicle ■ Battery-electric vehicle

Global electric-vehicle sales, 2010–17, thousands, CAGR<sup>1</sup>

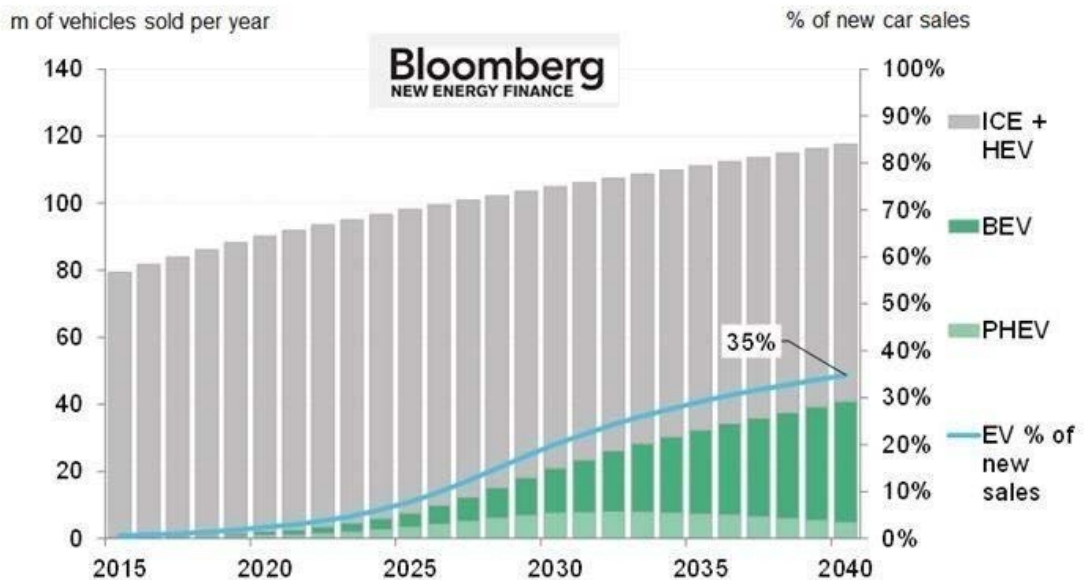
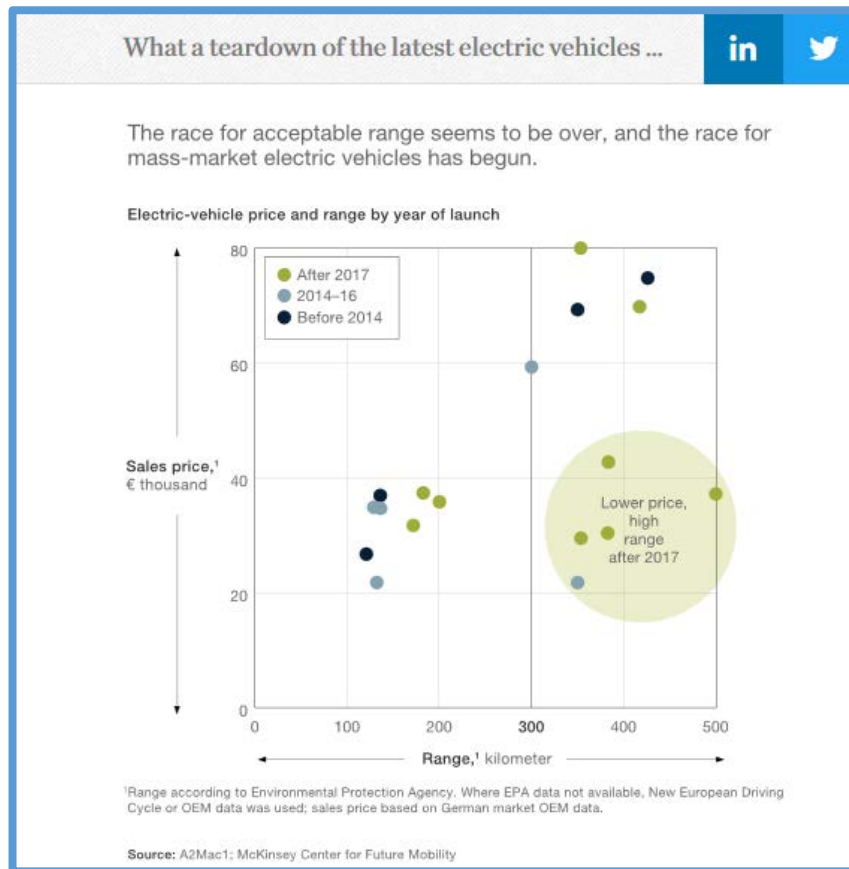


Global electric-vehicle sales, 2010–17, % share of all vehicles



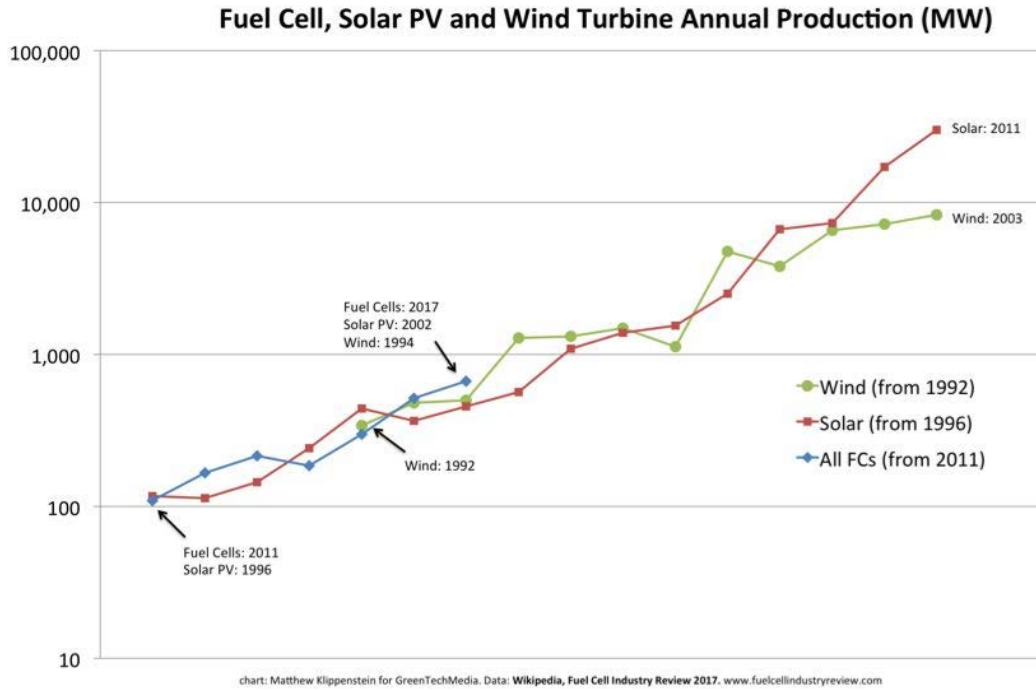
<sup>1</sup>Compound annual growth rate.

McKinsey&Company | Source: EV-volumes.com; McKinsey analysis



## Annexe 5 : Éléments de cadrage pour l'hydrogène et les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV)

Green Tech Media: « [Fuel Cells in 2017 Are Where Solar Was in 2002](#) »



# Hydrogen scaling up

A sustainable pathway for the global energy transition

Hydrogen Council November 2017

Exhibit 12: FCEVs have superior range and refueling times

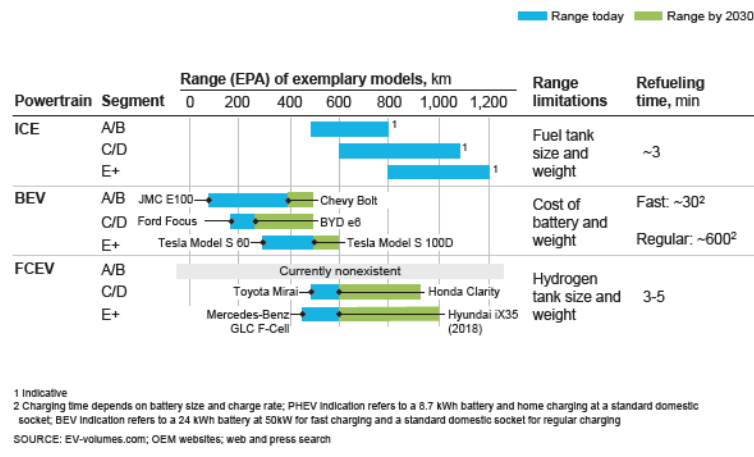
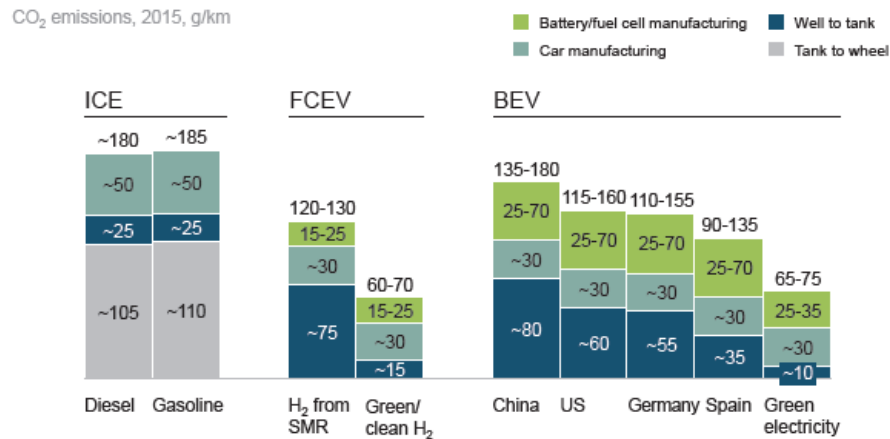


Exhibit 13: FCEVs can achieve very low CO<sub>2</sub> emissions if the whole lifecycle is considered



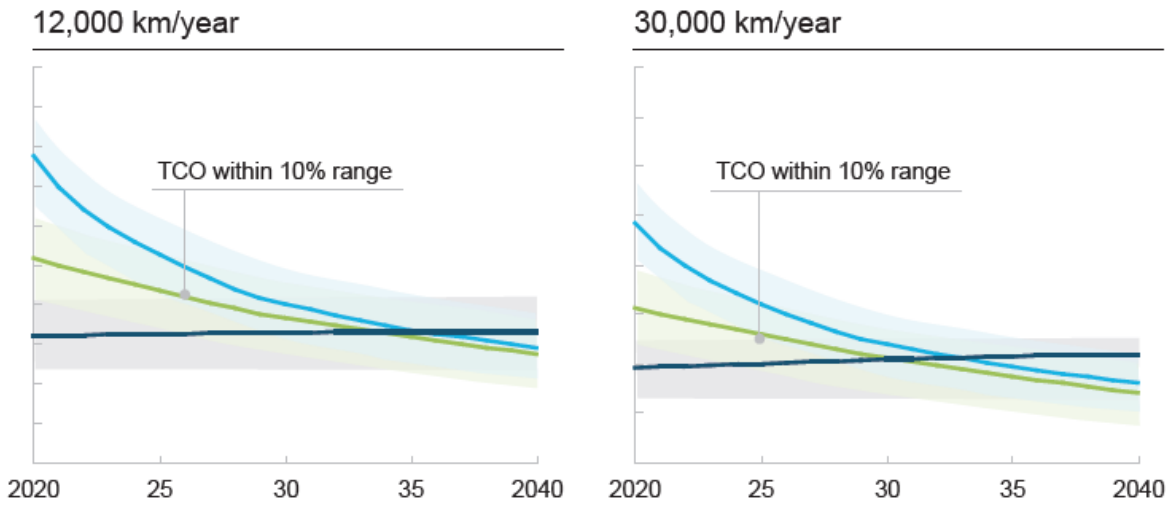
Assumption: compact car (C-segment) as reference vehicle (4.1 l/100 km diesel; 4.8 l/100 km gasoline; 35.6 kWh battery), 120,000 km lifetime average grid emissions in China, Germany, Spain in 2015; EV manufacturing (excl. fuel cell and battery) 40% less energy-intensive than ICE manufacturing; 10 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub> from SMR; 0.76 kg H<sub>2</sub>/100 km; 13 kWh/100 km  
SOURCE: EPA; A Portfolio of Powertrains for Europe (2010); Toyota Mirai LCA; IVL; Enerdata; expert interviews

### Exhibit 11: FCEVs could become cost competitive between 2030 and 2040

TCO ranges<sup>1</sup> of different powertrain technologies, EUR/km (indexed)

ILLUSTRATIVE C/D SEGMENT

FCEV BEV ICE



<sup>1</sup> Based on fuel price variants and sensitivities to learning curves  
SOURCE: A Portfolio of Powertrains for Europe (2010), updated with Hydrogen Council vision



## A cost benefit analysis of fuel cell electric vehicles

Anna Creti, Alena Kotelnikova, Guy Meunier, Jean-Pierre Ponsard

Table 1 Summary of the data for the base case

Simplified Data Sheet	Unit	2015	2020	2025	2030	2050
<b>Market size (car life time 10 years)</b>	#1000	1	95	453	1350	7500
<b>Manufacturing costs</b>						
FCEV purchase cost (19% TVA is not included)	k€	60,0	37,9	32,4	28,9	23,1
ICE purchase cost (19% TVA is not included)	k€	22,0	21,4	21,3	21,1	20,5
<b>Fuel costs</b>						
FCEV						
Hydrogen production cost (delivery cost to HRS included)	€/kg	7,0	5,8	6,1	6,3	6,8
Hydrogen consumption per 100 km	kg/100km	0,95	0,87	0,84	0,80	0,70
ICE						
Gasoline price per litre (TVA 19% is not included)	€/l	1,30	1,35	1,40	1,46	1,71
Gasoline consumption per 100 km	l/100km	7,04	6,2	4,97	4,88	4,8
<b>Infrastructure costs</b>						
Number of HRS	#	40	220	926	2234	9257
Capital cost per unit of car	k€	62,24	2,39	2,02	1,65	1,18
Opex per unit of car	k€	6,22	0,24	0,16	0,13	0,09
<b>CO2 emissions</b>						
Hydrogen	kgCO2/100km	9,0	6,2	5,0	3,8	1,7
Gasoline	kgCO2/100km	19,8	17,4	14,0	13,7	13,5

Source : Creti et al. (2015)

## Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ?

Étienne Beeker\*

La Note d'analyse, n° 15, France Stratégie, août 2014

FIG. 2 : COÛTS DE PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE SUIVANT DIVERS SCÉNARIOS

Scénario		1	2	3	4	5	6
Coût de l'électrolyseur	€/kw	2 000	2 500	800	800	800	800
Rendement électrolyse		60 %	50 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Production annuelle	kwh	7 000	2 000	2 000	1 000	500	7 000
Coût de l'électricité stockée	€/MWh	70	70	70	140	0	60
Coût de l'H2 produit	€/kg	7,0	18,3	6,1	12,2	10,5	3,7
	soit \$/MBtu	68	177	59	118	102	36
	soit €/MWh	178	463	154	309	267	94

Source : CGSP

	<b>Véhicule Hydrogène</b>	<b>Véhicule thermique (diesel)</b>
<i>Consommation</i>	1,00 kg H <sub>2</sub> /100 km	4,6 l/100 km
<i>Prix du carburant hors taxes</i>	13 €/kg H <sub>2</sub>	0,75 €/l GO
<i>Dépense en carburant</i>	13,0 €/100 km	3,5 €/100 km
<i>Émissions directes de CO<sub>2</sub></i>	0,0 g/km	107,0 g/km

Source : CGSP



COMPLÉMENT 13

## RÉSUMÉ DU RAPPORT *PERSPECTIVES SUR LES TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES 2017* DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

---

*Executive summary* traduit par Mathilde Salin<sup>1</sup>

### 1. Le système énergétique évolue, mais une volonté politique est nécessaire pour accélérer et orienter sa transformation

**Plusieurs tendances indiquent que le système énergétique mondial est en pleine évolution.** Le mix énergétique est en cours de redéfinition. Dans le secteur électrique, les capacités additionnelles renouvelables et nucléaires ont permis de répondre à la majorité de la croissance de la demande. Du côté de la demande, les technologies de transport innovantes se développent et devraient accroître la demande électrique. L'augmentation du niveau de vie conduira par ailleurs un nombre croissant de ménages à s'équiper d'appareils électroménagers, électroniques et autres biens électriques, ce qui poussera également à la hausse des besoins en électricité.

L'innovation technologique du secteur énergétique peut contribuer à sa transformation et la faciliter, mais des politiques fortes sont nécessaires. Le rapport *Energy Technology Perspectives 2017* (ETP 2017) [Perspectives sur les technologies énergétiques 2017, ETP 2017] met en avant le rôle de l'innovation dans le domaine énergétique – c'est-à-dire, le déploiement à grande échelle des technologies disponibles et le développement de technologies toujours novatrices – pour contribuer à des objectifs politiques multiples, tout en garantissant une énergie sûre, fiable et abordable.

---

<sup>1</sup> Département Économie, France Stratégie.

Le rapport annuel *Tracking Clean Energy Progress* (TCEP), inclus dans l'ETP 2017, examine l'évolution de différentes technologies au regard des objectifs climatiques mondiaux. Les résultats montrent que la transformation du système énergétique n'est pas conforme aux objectifs politiques internationaux fixés. Plusieurs technologies pâtissent d'un manque de soutien politique, ce qui entrave leur déploiement à plus grande échelle. Il existe notamment un important potentiel de progrès technologique en matière d'efficacité énergétique, de bioénergie et de technologies de captage et stockage du carbone (CSC), mais des politiques fortes seront nécessaires pour susciter les investissements requis.

Dans l'ensemble, seules quelques technologies énergétiques parmi celles examinées sont sur la bonne voie pour atteindre les objectifs de durabilité. Le TCEP montre toutefois que les avancées ont été substantielles dans les domaines où des politiques publiques ont fourni des signaux clairs montrant la valeur de l'innovation technologique, comme cela a été le cas pour le solaire photovoltaïque (PV), l'éolien terrestre, les véhicules électriques et le stockage de l'énergie.

Une approche intégrée est essentielle pour un futur énergétique durable. Les **technologies énergétiques sont interdépendantes et doivent donc être développées et déployées en parallèle**. Un système énergétique sûr, durable et abordable reposera sur des sources d'énergie diversifiées et s'appuiera davantage sur la production décentralisée. Il devra donc être mieux intégré et géré de manière plus systémique. Cela permettra une plus grande efficacité, des coûts réduits et le recours à un éventail plus large de technologies et de combustibles. Cependant, le succès dépendra de la manière dont le système énergétique fonctionne dans son ensemble, et non des développements technologiques isolés. Pour les responsables politiques, le principal enjeu sera de passer d'une perspective compartimentée et pilotée par l'offre à une vision permettant l'intégration des systèmes. Pour cela, des outils de planification efficaces, des cadres réglementaires propices au changement et un dialogue politique renforcé sont nécessaires.

**Un système électrique intégré et connecté est un élément essentiel de la transformation du secteur énergétique.** L'électrification croissante offre la possibilité d'améliorer la flexibilité, l'efficacité et la performance environnementale des systèmes électriques. Le développement des technologies facilitant l'intégration des systèmes, comme le stockage de l'énergie, résulte actuellement de la diminution des coûts, de réglementations de plus en plus favorables et d'une meilleure compréhension de leur rôle. En 2016, le déploiement de nouvelles capacités de stockage, principalement des batteries, a augmenté de plus de 50 %. L'utilisation généralisée des technologies numériques peut contribuer à accélérer ce changement.

L'intégration du système énergétique et une meilleure gestion de la demande apporteront de nouvelles opportunités d'optimisation et une plus grande efficacité dans la fourniture de services. Un système énergétique intelligent rend possible des mesures de gestion de la demande. Des technologies comme les infrastructures de mesure avancée, les appareils intelligents ou les compteurs intelligents bidirectionnels permettent une meilleure gestion de la demande et peuvent également inciter les consommateurs à jouer un rôle plus actif dans le système énergétique. Ces approches peuvent également encourager une utilisation plus efficace de l'énergie et contribuer à la gestion de la charge et à la flexibilité du système.

Une planification coordonnée à long terme pour des investissements dans des infrastructures plus robustes et plus intelligentes est nécessaire afin de garantir durablement l'efficacité et la fiabilité du système. Parvenir à un système énergétique efficace et bas carbone nécessitera des investissements soutenus dans différentes infrastructures. De grands marchés se sont déjà heurtés à certaines limites de capacités de transmission électrique qui menacent le développement futur des réseaux et des renouvelables intermittents, comme en Allemagne ou en République populaire de Chine. Le déploiement des infrastructures de transport et de stockage du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en est un autre exemple : dans la plupart des applications individuelles, étant donné les faibles quantités de CO<sub>2</sub> en jeu, les infrastructures de transport et de stockage ont peu de chances d'être rentables. Une coordination et une planification efficace, du niveau local au niveau régional, pourraient permettre de réduire ces difficultés.

**Le progrès technologique requiert un soutien politique fort et coordonné.** Alors que la compétitivité économique des nouvelles technologies s'améliore, les mesures politiques n'ont pas toujours l'impact escompté sur le marché et ne permettent pas d'orienter les choix technologiques dans une direction optimale. Des réglementations appropriées doivent plus clairement valoriser sur les marchés les avantages liés à la sécurité énergétique et à la durabilité afin d'encourager les investissements à plus long terme. Les mécanismes du marché ne suffiront pas, à eux seuls, à donner l'élan nécessaire. Des mesures vigoureuses et cohérentes, coordonnées au niveau de l'ensemble des secteurs énergétiques, devraient mieux prendre compte les objectifs de la politique énergétique, notamment en ce qui concerne la fiscalité, le commerce international, la planification urbaine et l'innovation. Celles-ci devraient intervenir aux différents stades du processus de prise de décisions, qu'elles soient commerciales ou gouvernementales.

## 2. Les ambitions accrues pour un système énergétique durable ne sont pas traduites par des actions concrètes

Le principal enjeu actuel est de garantir que l'élan donné à la transformation du secteur énergétique se poursuive et à en accélérer la dynamique. La ratification de l'Accord de Paris et les appels à mettre en œuvre les Objectifs de développement durable des Nations unies sont la preuve que le changement climatique et les préoccupations environnementales font l'objet d'un soutien planétaire important. Il faudra cependant envoyer rapidement des signaux clairs alignés à ces objectifs à long terme afin d'orienter le secteur énergétique vers la durabilité.

**La trajectoire actuelle ne répond pas aux exigences fixées.** Le rapport ETP 2017 présente trois trajectoires pour le développement du secteur énergétique d'ici 2060. Le scénario technologique de référence (*Reference Technology Scenario*, RTS) est le scénario de base ; il prend en compte les engagements climatiques et énergétiques existants par pays en y incluant les contributions déterminées au niveau national au titre de l'Accord de Paris. Le scénario RTS – qui reflète donc les ambitions actuelles de chacune des régions du monde – ne permet pas d'atteindre les objectifs d'atténuation du changement climatique, mais il marquerait néanmoins une évolution significative par rapport à une approche historique de statu quo.

**Une décarbonation plus ambitieuse nécessite des efforts accrus et un engagement politique soutenu.** Le scénario 2 °C (2DS) et le scénario au-delà de 2 °C (B2DS) fixent tous deux une trajectoire de décarbonation rapide conforme aux objectifs politiques internationaux. Le scénario 2DS est le principal scénario climatique de la série ETP depuis de nombreuses années et il a été largement utilisé par les responsables politiques et les acteurs privés pour évaluer leurs stratégies climatiques. Pour la première fois, le scénario B2DS examine comment et jusqu'où les technologies énergétiques propres actuellement connues pourraient évoluer si elles étaient poussées jusqu'à leurs limites réalistes, conformément aux aspirations plus ambitieuses formulées par les pays dans l'Accord de Paris.

**Les technologies aujourd'hui novatrices ont besoin d'un soutien politique fort pour atteindre les objectifs climatiques.** Dans le scénario B2DS, le secteur énergétique parvient à la neutralité carbone d'ici 2060 et à limiter la hausse de température future à 1,75 °C d'ici 2100, soit le point médian de la plage de températures formulée dans l'Accord de Paris. Cette trajectoire implique que tous les leviers politiques disponibles soient activés au cours de la période et ce, dans l'ensemble des secteurs et dans le monde entier. Cela nécessiterait une action politique sans précédent, ainsi que l'effort et l'engagement de l'ensemble des parties prenantes.

### 3. Une action coordonnée et un panachage de technologies sont nécessaires pour parvenir à des solutions rentables

**Il est nécessaire d'agir dans l'ensemble des secteurs afin d'exploiter les solutions les plus rentables.** Les opportunités technologiques ne manquent pas, tant du côté de l'offre que de la demande du secteur énergétique. Combiner différentes technologies permettra de fournir des services énergétiques fiables et abordables, tout en réduisant les émissions.

Alors que l'électrification des usages finaux s'accroît, décarboner les systèmes électriques tout en augmentant la part d'électricité dans la consommation finale d'énergie crée de nouveaux défis et de nouvelles opportunités. Les tendances actuelles entraîneraient une augmentation de la part de l'électricité dans la demande finale d'énergie, dans tous les secteurs de la consommation finale, de 18 % à l'heure actuelle à plus de 26 % d'ici 2060 dans le scénario RTS, soit l'augmentation relative la plus importante parmi tous les vecteurs énergétiques. Mais l'électrification des usages finaux peut également permettre de s'affranchir de notre dépendance directe aux combustibles fossiles tout en décarbonant la production d'électricité. Dans les scénarios 2DS et B2DS, l'électricité devient le principal vecteur d'énergie finale, légèrement au-dessus du pétrole. Le changement est particulièrement remarquable dans le secteur des transports, où l'électricité devient le premier combustible pour les modes de transportation terrestres dans le scénario B2DS.

**L'électricité décarbonée est la clef de voûte de la transition énergétique.** Le secteur électrique mondial peut parvenir à des émissions de CO<sub>2</sub> nettes nulles d'ici 2060 dans le scénario 2DS, au moyen du déploiement à plus grande échelle d'un portefeuille de technologies propres et d'une production électrique issue à 74 % des renouvelables (dont 2 % de bioénergie durable avec CSC [BECSC]), à 15 % du nucléaire, à 7 % de centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles et équipées de dispositifs CSC, le reste provenant de la combustion du gaz naturel.

**Des bâtiments plus efficaces énergétiquement contribuent également à la transformation d'ensemble du système énergétique.** Le déploiement rapide des technologies d'éclairage, de climatisation et des appareils électroménagers énergétiquement efficaces pourrait permettre d'économiser 50 EJ, soit l'équivalent de près de trois quarts de la demande électrique mondiale actuelle, d'ici 2030. Ces économies d'énergie résulteraient de l'adoption accélérée d'équipements électriques sans que cela représente un poids additionnel pour le secteur de production d'électricité.

La technologie et les politiques publiques ont un rôle primordial à jouer pour guider le secteur des transports vers une plus grande durabilité. L'électrification apparaît comme la principale trajectoire bas carbone pour le secteur des transports. Cette tendance est

déjà en partie à l'œuvre, et le stock de voitures électriques devrait être multiplié par 28 d'ici 2030 dans le scénario RTS, par rapport au niveau actuel de deux millions de véhicules. Le scénario 2DS accroît cette ambition à 160 millions de voitures électriques, tandis que le scénario B2DS prévoit 200 millions de voitures électriques sur les routes à cette même date, ce qui conduirait à une part de 90 % de voitures électriques parmi l'ensemble des voitures sur les routes en 2060. Accélérer le mouvement pour la mobilité électrique requerra des développements technologiques et investissements infrastructurels conséquents, sur la base d'un soutien politique fort. Les politiques et les technologies permettant de réduire le besoin en transport individuel – par exemple via une planification urbaine améliorée ou le recours accru aux transports collectifs – peuvent permettre de mieux gérer le déploiement des nouvelles technologies et réduire significativement les investissements requis.

**Les industries énergivores sont des acteurs essentiels de toute stratégie de transformation durable.** La demande énergétique de l'industrie est la plus élevée parmi les secteurs de consommation finale, et elle devrait augmenter de près de deux tiers d'ici 2060 dans le scénario RTS. Des opportunités existent pour améliorer l'efficacité de la production, maximiser l'usage des ressources locales disponibles et optimiser l'utilisation des matériaux. Des technologies qui ne sont pas encore commercialisées peuvent jouer un rôle majeur dans la décarbonation des procédés industriels, contribuant à une réduction de 18 % des émissions directes cumulées de CO<sub>2</sub> dans le scénario 2DS et de 36 % dans le scénario B2DS. Cela démontre la nécessité de soutenir l'innovation dans les secteurs économiquement stratégiques, comme le fer, l'acier, le ciment et l'industrie chimique.

Il existe un potentiel d'économies d'énergie considérable en matière de chauffage et de refroidissement, qui reste largement inexploité. À l'heure actuelle, le chauffage et le refroidissement dans les bâtiments et l'industrie représentent près de 40 % de la consommation finale d'énergie – soit une part plus importante que les transports (27 %). En outre, près de 65 % de cette demande repose sur des sources de combustibles fossiles. L'efficacité énergétique et le recours à des vecteurs d'énergie finale propres (comme l'électricité décarbonée et le chauffage collectif) pourraient permettre de réduire la consommation de combustibles fossiles pour le chauffage et le refroidissement de moitié d'ici 2060 par rapport aux niveaux actuels.

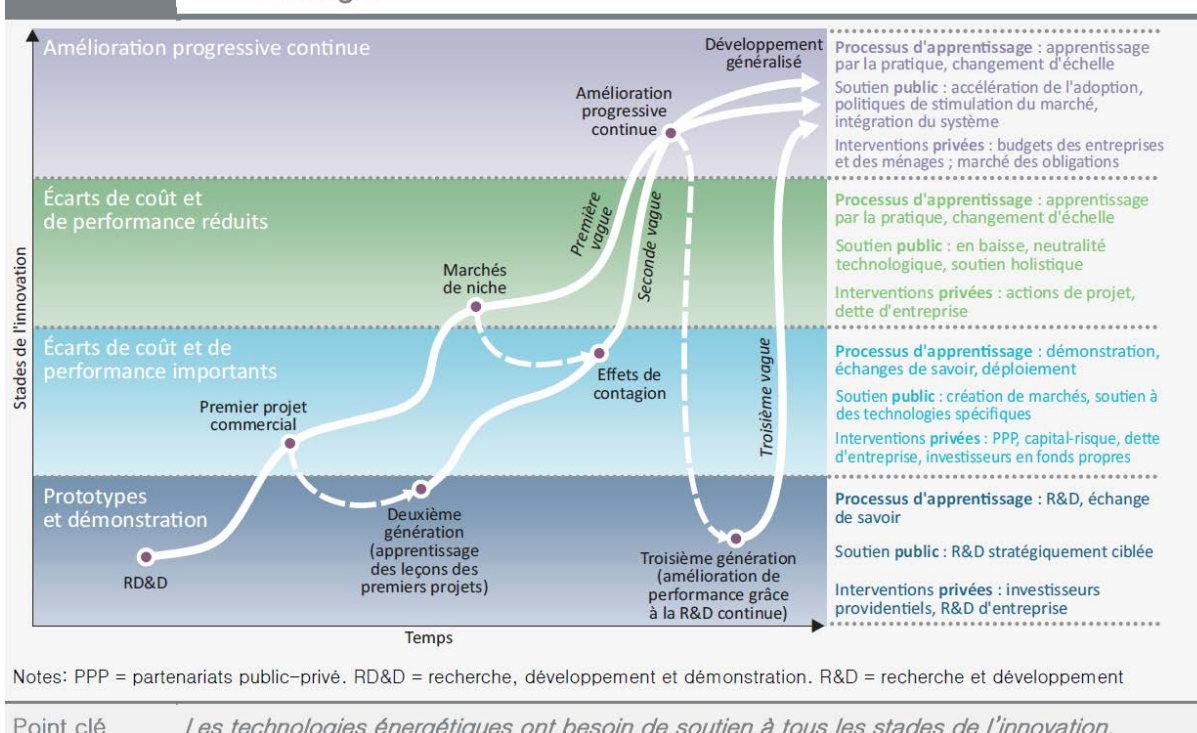
Parvenir à des émissions négatives, en particulier dans les secteurs de la production électrique et de la transformation des combustibles, devient indispensable à mesure que s'élèvent les ambitions bas carbone. Dans le scénario B2DS, la BECSC fournit près de 5 gigatonnes « d'émissions négatives » en 2060. Ces émissions négatives sont d'une importance primordiale pour que le secteur énergétique devienne neutre en émissions d'ici 2060. Bien qu'elles soient confrontées à de nombreux défis, les technologies BECSC permettent de compenser des émissions résiduelles produites ailleurs dans le



système énergétique encore plus coûteuses ou difficiles techniquement à réduire directement. Cela requerra un apprentissage technologique accéléré et un changement d'échelle massif dans les secteurs de la bioénergie durable et du CSC, qui accusent pour le moment un certain retard.

L'innovation doit être soutenue à tous les niveaux, depuis les premières phases de la recherche jusqu'à la pleine démonstration et le déploiement. La transition vers un nouveau système énergétique nécessite des innovations à la fois progressives et radicales. Les gouvernements ont un rôle important à jouer pour garantir un soutien prévisible et à long terme à tous les stades de l'innovation – i.e. depuis la recherche fondamentale et appliquée jusqu'aux phases ultérieures de développement, démonstration et déploiement. L'allocation des ressources entre les différentes technologies doit prendre en compte à la fois les opportunités et les défis en termes d'innovation à court et à long terme, mais également refléter le niveau de maturité technologique (Figure 1.1).

Figure 1.1. Le processus d'innovation technologique dans le domaine de l'énergie



**La coopération internationale entre les différents niveaux de gouvernance et avec le secteur privé est essentielle.** La coopération multilatérale peut améliorer la rentabilité des innovations technologiques dans le domaine de l'énergie et renforcer la confiance en démontrant que des progrès sont accomplis à l'échelle planétaire. La

mondialisation fournit un cadre plus ouvert pour l'innovation, permettant de mettre en commun des ressources pour accélérer la recherche et le développement (R & D), prendre en charge la démonstration et stimuler un déploiement plus rapide des technologies ayant fait leurs preuves. Accroître les capacités d'innovation locale est également essentiel au déploiement réussi des technologies innovantes qui peuvent aider à atteindre les objectifs politiques et environnementaux locaux tout en contribuant aux objectifs de durabilité mondiaux. Les initiatives existantes, telles que les Programmes de collaboration technologique de l'AIE, le forum Clean Energy Ministerial et la Mission Innovation, devraient être plus solidement ancrées dans l'ensemble des processus décisionnels.

### Principales recommandations à l'intention des responsables politiques

- Les gouvernements doivent élaborer une vision d'avenir pour un futur énergétique durable, qui aborde les multiples enjeux de la politique énergétique et permette de suivre les progrès accomplis au regard des objectifs fixés. Afin que le secteur énergétique puisse répondre de manière optimale aux multiples défis qui lui sont posés et atteindre les objectifs politiques fixés, il sera essentiel de définir des trajectoires vers une transition énergétique à long terme qui satisfasse aux objectifs de sécurité énergétique, de lutte contre le changement climatique et de qualité de l'air, ainsi que de garantir leurs progrès.
- La coopération internationale doit être renforcée pour atteindre les objectifs globaux. Les programmes conjoints d'innovation permettent de créer des opportunités de marché qui bénéficient à la fois aux fabricants et aux utilisateurs des technologies, tout en contribuant à la transformation efficace des systèmes énergétiques mondiaux. La collaboration avec les acteurs locaux, afin de renforcer les capacités et de partager les bonnes pratiques, permet également de soutenir une action locale adaptée aux contextes.
- Le soutien politique au développement technologique devrait être renforcé à tous les stades du cycle de l'innovation. Ce soutien devrait en outre être mesurable et concerner tous les stades de l'innovation (y compris la recherche, le développement, la démonstration et le déploiement) afin de faciliter à la fois l'innovation progressive et radicale mais également des mesures de déploiement pour des technologies spécifiques. Les initiatives telles que les Programmes de collaboration technologique de l'AIE, le forum Clean Energy Ministerial et la Mission innovation, sont des plateformes clés pour coordonner et accélérer les efforts mondiaux.

Les mécanismes politiques, financiers et de marché doivent être ajustés afin de soutenir les nouveaux modèles d'affaires rendus possibles par l'évolution du paysage

technologique. Les structures et les réglementations de marché devraient mieux exploiter l'opportunité que représente l'accès accru à l'information énergétique afin de créer de nouveaux modèles de transaction de l'énergie. Un dialogue et une coordination institutionnels plus efficaces devraient être mis en place entre les niveaux de gouvernance nationaux, régionaux et locaux, mais aussi avec les autres acteurs du secteur de l'énergie, pour accélérer la transformation du secteur et parvenir à de nouvelles solutions.

Les responsables politiques doivent développer une meilleure compréhension des opportunités et des défis liés à la numérisation croissante du secteur de l'énergie. On assiste à une convergence croissante entre les secteurs du numérique et de l'énergie. Cette convergence offre de nouvelles perspectives, mais présente également des risques. Pour que numérisation et évolution du paysage énergétique œuvrent ensemble de manière pertinente et efficace, il faudra veiller à la qualité des données produites et à la rigueur des analyses qui en seront faites.





## COMPLÉMENT 14

# COÛTS D'ABATTEMENT DU CO<sub>2</sub> ET VALEUR TUTÉLAIRE DU CARBONE

---

Contribution du Commissariat général au développement durable

### 1. Principe général dans le calcul socioéconomique

**Proposition de définition** – Dans le calcul socioéconomique classique, le **principe général d'un coût d'abattement** consiste (i) à **évaluer le surcoût** associé à l'activation d'un levier technologique ou comportemental, par rapport à un scénario de référence (non ou moindre activation de ce levier) ; (ii) à lui **retrancher d'éventuels bénéfices** (en général une économie d'énergie, mais éventuellement d'autres bénéfices tels qu'une diminution de la pollution atmosphérique, de nuisances sonores, de la congestion, etc.) ; (iii) à **rapporter cette différence aux émissions de GES évitées et actualisées**. Ceci est résumé par la formule générale :

$$C_{CO_2} = \frac{\text{Investissement} - \text{GainEnergie} - \text{GainAutresExternalités}}{\text{EmissionsEvitées}}$$

En toute logique, le calcul du coût d'abattement suit donc les principes de l'analyse socioéconomique :

- les investissements et gains éventuels sont évalués sur la base de coûts hors taxes : en particulier, on travaille hors TVA et hors TICPE, TICFE, etc., pour les dépenses énergétiques ;
- les gains associés aux émissions évitées et autres externalités sont calculés en tenant compte du mieux possible des phases de production amont et aval (approche cycle de vie) ;
- il faudrait théoriquement prendre également en compte le COFP (coût d'opportunité des fonds public) dans les coûts au numérateur ;

- l'ensemble des grandeurs sont actualisées au taux public.

### **Remarques relatives à l'interprétation**

- La nature même de l'équation, avec un numérateur qui est une différence de plusieurs termes, entraîne une **forte variabilité du résultat**, en particulier selon que l'on prend en compte ou non les externalités autres que le CO<sub>2</sub>.
- Le coût d'abattement socioéconomique ainsi calculé peut s'interpréter comme la valeur du carbone, constante (en euros constants) sur la durée de vie de l'investissement, permettant de rentabiliser celui-ci du point de vue de la collectivité, c'est-à-dire d'annuler sa valeur (socioéconomique) actuelle nette.
- Le coût d'abattement socioéconomique ainsi calculé caractérise le levier (technologique ou comportemental) étudié et renseigne uniquement sur sa rentabilité potentielle du point de vue de la collectivité (dans la mesure où il suit les principes du calcul public et ne distingue pas les efforts des différentes catégories d'agents).
- **Cette seule valeur ne reflète pas le niveau ou la répartition des efforts auxquels doivent consentir les différents acteurs** pour mettre en œuvre collectivement un levier donné. En conséquence, le calcul d'un coût d'abattement socioéconomique comme le recours à la VTC **ne permettent pas d'évaluer ou de calibrer directement un instrument de politique publique** (dont la conception doit s'appuyer sur une compréhension de la manière dont il influence ou modifie le comportement de chacun des acteurs qu'il cible).
- Le coût d'abattement socioéconomique est issu d'une logique de calcul similaire à la valeur tutélaire. Il peut donc lui être comparé à condition d'avoir en tête une **mise en garde majeure** : le coût d'abattement socioéconomique correspond à une **valeur constante sur la durée de vie de l'investissement réalisé** à rapporter non pas à la valeur tutélaire à la date de l'investissement mais à son « équivalent constant » sur la durée de vie de l'investissement. Autrement dit, on peut comparer le coût d'abattement socioéconomique calculé pour une période d'investissement donnée à la valeur moyenne de la VTC sur cette période (pondérée par les quantités d'émissions évitées actualisées chaque année par le projet ou la mesure).
- Ainsi, si la VTC croît à un taux supérieur à 4,5 % sur une période donnée, un coût d'abattement socioéconomique supérieur à la valeur carbone à un instant  $t$  au sein de cette période ne signifie pas nécessairement qu'il faille attendre avant de déclencher l'investissement. La période de référence (période de vie de l'investissement) doit être précisée pour pouvoir interpréter et comparer le coût d'abattement.

## 2. Ordres de grandeur de coûts d'abattement socioéconomiques

Cette partie présente des ordres de grandeur de coûts d'abattement socioéconomiques calculés à partir de résultats ou d'hypothèses de différentes études ou modèles utilisés par le Commissariat général au développement durable (CGDD).

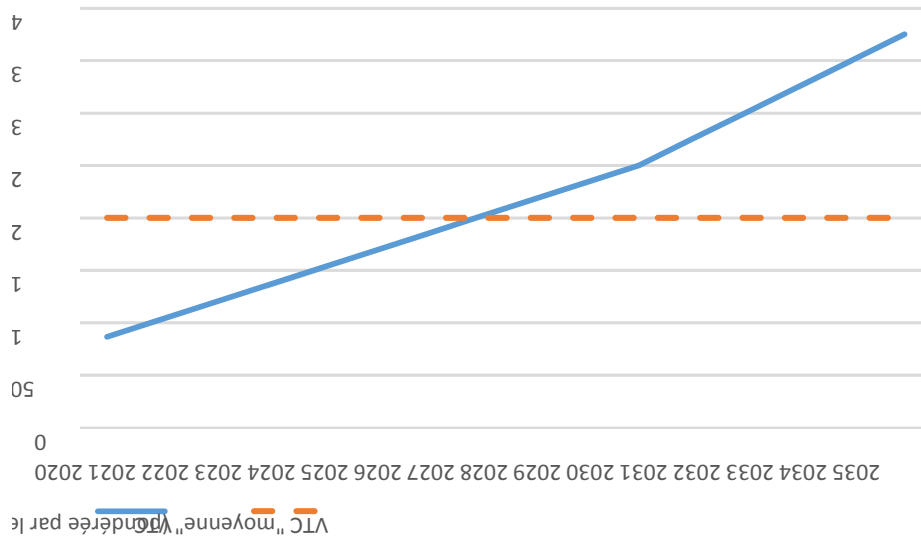
Il convient de remarquer que ces résultats, bien qu'issus de travaux relevant tous de l'analyse socioéconomique, ne reposent pas sur des périmètres de coûts et gains similaires : en particulier, la pollution locale, le bruit, et le coût d'opportunité des fonds publics (COFP) sont parfois pris en compte, parfois non. Cette remarque incite donc à la prudence dans leur utilisation.

Ces résultats préliminaires seront consolidés dans une prochaine publication.

	Coût d'abattement CO <sub>2</sub>	Commentaires
Amélioration de l'efficacité énergétique des VT (voitures thermiques)	Coût d'abattement socioéconomique pour un véhicule acheté <b>en 2020 : autour de 120€/tCO<sub>2</sub></b> [durée de vie du véhicule : 16 ans]	Hypothèse : coût pour abaisser les émissions d'un véhicule de 1gCO <sub>2</sub> /km : 105€/gCO <sub>2</sub> (consommation « réelle », et non « constructeur »). Baril à 130\$ en 2030 (prix du carburant : 1€/L HTT). Prise en compte de la valorisation de l'externalité « pollution de l'air ». Externalité « bruit » non prise en compte. COFP non pris en compte.

Il est proposé de s'arrêter sur ce premier exemple pour illustrer la manière de comparer le coût d'abattement avec la trajectoire de la valeur tutélaire du CO<sub>2</sub> (VTC). On compare une situation où un véhicule neuf plus cher mais moins émetteur est acheté en 2020, à une situation où un véhicule plus émetteur mais moins cher est choisi. Le surcoût permet d'économiser du CO<sub>2</sub> (et du carburant) sur la durée de vie du véhicule qui est supposée de 16 ans. On suppose que le kilométrage annuel est constant et donc que l'économie annuelle de CO<sub>2</sub> est constante. Dans ce cas<sup>1</sup>, il faut comparer le coût d'abattement à la moyenne pondérée par le coefficient d'actualisation, sur la période de 16 ans, de la valeur carbone.

<sup>1</sup> Théoriquement, il faut comparer le coût d'abattement à la moyenne pondérée par le coefficient d'actualisation multiplié par l'économie de CO<sub>2</sub>, de la valeur carbone ; ici, la quantité de CO<sub>2</sub> économisée étant constante au cours du temps, on peut l'ignorer.



La valeur moyenne (pondérée par le coefficient d'actualisation) est de 200€/tCO<sub>2</sub> (inférieure à la moyenne arithmétique qui est de 217€/tCO<sub>2</sub>), montant supérieur au coût d'abattement du CO<sub>2</sub> associé à l'amélioration de l'efficacité énergétique du véhicule. Cela signifie qu'il est donc rentable de mettre en œuvre ce levier dès 2020.



	Coût d'abattement CO <sub>2</sub>	Commentaires
Amélioration de l'efficacité énergétique des VT (voitures thermique)	Coût d'abattement socioéconomique pour un véhicule acheté en <b>2020 : autour de 120 €/tCO<sub>2</sub></b> [durée de vie du véhicule: 16 ans]	Hypothèse : coût pour abaisser les émissions d'un véhicule de 1 gCO <sub>2</sub> /km : 105 €/gCO <sub>2</sub> (consommation « réelle », et non « constructeur »).  Baril à 130\$ en 2030 (prix du carburant : 1€/L HTT).  Prise en compte de la valorisation de l'externalité pollution de l'air.  Externalité « bruit » non prise en compte.  COFP non pris en compte.
Passage VT -> VE (voiture électrique)  Usage « mixte »	Usage « mixte » : coût d'abattement socioéconomique pour un véhicule acheté en 2030 : autour de 400 €/tCO <sub>2</sub>  [durée de vie du véhicule :16 ans]	Calcul tirés de la publication « Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques (juillet 2017) », cas d'un second véhicule en usage mixte (i.e. en milieu rural et urbain représentatif du cas moyen).  Batterie à 100€/kWh, 24 kWh (citadine).  Prix du carburant HTT : 1,1 €/L en 2030, 1,4 €/L en 2050.  Pollution locale et bruit pris en compte.  Prise en compte des émissions associées à la production de la batterie.  COFP pris en compte.

	Coût d'abattement CO <sub>2</sub>	Commentaires
Passage VT -> VE (voiture électrique) Usages urbains	<p>Usage <i>urbain dense</i> : coût d'abattement socioéconomique <b>pour un véhicule acheté</b> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- en 2020 : autour de 450 €/tCO<sub>2</sub></li> <li>- en 2030 : 0 €/tCO<sub>2</sub></li> </ul> <p><b>[durée de vie du véhicule : 16 ans]</b> avec un baril évoluant à 130 \$ en 2030 (prix du carburant : 1€/L HTT)</p> <p>Usage <i>urbain très dense</i> : coût d'abattement socioéconomique <b>pour un véhicule acheté</b> :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- en 2020 : 100 €/tCO<sub>2</sub></li> <li>- en 2030: négatif de l'ordre de - 130 €/tCO<sub>2</sub></li> </ul> <p>[durée de vie du véhicule :16 ans]</p>	<p>Même source et hypothèses générales que précédemment, cas urbains.</p> <p>Urbain très dense : 6750 hab./km<sup>2</sup>.</p> <p>Urbain dense : 2250 hab./km<sup>2</sup>.</p> <p>Remarque : le coût d'abattement est inférieur à celui obtenu pour le cas « mixte » car en milieux urbains :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les véhicules thermiques consomment davantage ;</li> <li>- les externalités associées, en particulier le bruit et la pollution locale, sont accrues.</li> </ul>
Rénovation énergétique dans les bâtiments tertiaires	<p>Coût d'abattement socioéconomique : <b>autour de 250 €/tCO<sub>2</sub></b>, pour des mesures supplémentaires mises en œuvre chaque année entre <b>2020 et 2050</b>.</p>	<p>Chiffrages tirés des travaux effectués à partir du modèle CGDD de rénovation dans le tertiaire, pour la stratégie nationale bas carbone, par comparaison entre un scénario avec mesures supplémentaires et un scénario avec mesures existantes. Publication à venir.</p> <p>Pollution locale non prise en compte.</p> <p>COFP pris en compte.</p>
Rénovation énergétique dans les bâtiments résidentiels	<p>Coût d'abattement socioéconomique autour de 240 €/tCO<sub>2</sub> pour des rénovations réalisées en 2015-2016 [avec prise en compte des effets sur la période : 2015-2050].</p>	<p>Chiffres tirés des travaux effectués avec le modèle ResIRF du CGDD/CIREN.</p> <p>Contenu CO<sub>2</sub> de l'électricité de 180 gCO<sub>2</sub>/kWh.</p> <p>Effet rebond significatif.</p> <p>Autres externalités non prises en compte (en particulier la pollution locale qui pourrait constituer un bénéfice collatéral significatif).</p> <p>COFP non pris en compte.</p>

	<b>Coût d'abattement CO<sub>2</sub></b>	<b>Commentaires</b>
Autoroute électrique (équipée de caténaire) avec camions hybrides (équipés de pantographes)	<p>Coût d'abattement socioéconomique :</p> <p>2020 : 125 à 400 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 10 ans]</p> <p>2030 : 75 à 300 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 10 ans]</p>	<p>Calculs issus de la publication « Concept d'autoroute électrique ».</p> <p>Hypothèses principales : coûts d'infrastructure 1,5 à 2,5 M€/km, trafics de 6 000 à 7 000 PL/j.</p> <p>Part de trajet en mode électrique : ¾ environ.</p> <p>Pollution locale et bruit pris en compte.</p> <p>Prix du carburant : 0,62 ; 1,07 ; 1,21 €/L HTT pour 2020, 2030, 2040.</p> <p>COFP pris en compte.</p>
PL tout électrique	<p>Coût d'abattement socioéconomique :</p> <p>2020 : 500 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 10 ans]</p> <p>2030 : 250 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 10 ans]</p> <p>2040 : 140 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 10 ans]</p>	<p>Même source et hypothèses que précédemment.</p> <p>Coût de la batterie : 400, 200, 167 €/kWh pour 2020, 2030, 2040.</p> <p>Densité énergétique de la batterie : 110, 165, 220 Wh/kg pour 2020, 2030, 2040.</p>
Autobus électrique	<p>Coût d'abattement socioéconomique :</p> <p>Urbain dense :</p> <p>2020 : 170 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 16 ans]</p> <p>2025 : -100 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 16 ans]</p> <p>Urbain très dense :</p> <p>2020 : 30 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 16 ans]</p> <p>2025 : -200 €/tCO<sub>2</sub> [durée de vie 16 ans]</p>	<p>Calculs tirés de la publication « Analyse coûts bénéfiques des véhicules électriques, Les autobus et autocars, octobre 2018 ». Calcul effectué en comparaison avec un bus diesel euro 6.</p> <p>Remarque : les autres externalités (bruit et pollution locale) permettent d'abaisser sensiblement le coût d'abattement CO<sub>2</sub>.</p> <p>Prise en compte des émissions associées à la production de la batterie.</p> <p>COFP pris en compte.</p>

	Coût d'abattement CO <sub>2</sub>	Commentaires
Autocar électrique	Coût d'abattement socioéconomique : 2020 : 450 €/tCO <sub>2</sub> [durée de vie 16 ans] 2025 : 60 €/tCO <sub>2</sub> [durée de vie 16 ans]	<i>Idem</i> ci-dessus.

**NB** : Les coûts socioéconomiques affichés dans ce tableau correspondent au prix du CO<sub>2</sub>, en euros constants sur la durée de vie de l'investissement, nécessaire pour annuler la valeur actuelle nette (VAN) du projet. Le taux d'actualisation utilisé pour calculer la VAN est de 4,5 %. La date affichée correspond à la date de mise en service de l'investissement ou d'achat.

La période ou la durée de vie indiquée est celle sur laquelle sont pris en compte les effets de la mesure ou de l'investissement. Ainsi, par exemple, lorsqu'un véhicule électrique est acheté en substitution d'un véhicule thermique, l'avantage procuré, en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de polluants et d'économie de carburant, prévaut sur toute la durée de vie du véhicule.

**Publications du CGDD relatant les travaux ayant permis d'établir ces coûts d'abattement :**

[Analyse coûts-bénéfices des véhicules électriques – Les voitures](#) (juillet 2017).

[Concept d'autoroute électrique : évaluation socioéconomique](#) (janvier 2017).

[Analyse coûts-bénéfices des véhicules électriques – Les autobus et autocars](#), (octobre 2018).



TROISIÈME PARTIE

**RÉFLEXIONS SECTORIELLES  
ET PROSPECTIVE TECHNOLOGIQUE**

---





## COMPLÉMENT 15

# VALEUR TUTÉLAIRE DU CARBONE : QUELQUES CONSIDÉRATIONS TECHNICO-ÉCONOMIQUES

---

François Dassa<sup>1</sup> et Jean-Michel Trochet<sup>1</sup>

La valeur tutélaire du carbone (VTC) recouvre deux démarches distinctes en économie :

- **L'économie normative** établit des valeurs de référence (VTC) visant à atteindre un objectif climatique donné à long terme. Elle établit ainsi des coûts marginaux de réductions d'émissions en s'appuyant sur une vision prospective d'ensemble des technologies de décarbonation. La VTC peut alors être interprétée comme la trajectoire de coûts marginaux optimaux qu'un planificateur bienveillant internalise à la marge de politiques publiques optimales, pour atteindre un objectif climatique donné dans un contexte lui aussi donné, en l'occurrence, l'atteinte d'une neutralité carbone en 2050 dans un monde où les autres pays se placent dans une trajectoire de limitation à long terme du réchauffement à +2 °C au plus.
- **L'économie institutionnelle** comprend le choix de règles du jeu et de politiques publiques opératoires et efficaces. De ce point de vue, c'est le complément naturel de la trajectoire de la VTC qui décrit les politiques publiques optimales pour atteindre à chaque horizon de temps ces valeurs optimales d'abattement des émissions. Parmi les politiques publiques, on a, en particulier, les politiques de R & D pour s'assurer que les technologies seront bien disponibles à l'horizon de temps considéré aux prix anticipés ou encore les politiques de déploiement pour les technologies « dans la monnaie » afin de tenir compte, le cas échéant, des échecs de marché. La question est alors celle du choix des outils de politique publique et de leur articulation avec la

---

<sup>1</sup> EDF.

VTC. Évaluer l'efficacité (en €/tCO<sub>2</sub>éq évitée) des normes et subventions, puis comparer à la trajectoire de VTC, peut aider à la cohérence et à la priorisation de l'action publique et des affectations budgétaires.

L'exercice de définition de la trajectoire de VTC présente donc a priori deux types de réflexions complémentaires :

- l'identification des solutions technologiques sectorielles assurant les réductions des émissions, leurs coûts, les technologies marginales constituant le coût d'abattement marginal ;
- une description des politiques publiques permettant de réaliser en pratique cette trajectoire de coûts marginaux, par exemple des politiques d'innovation technologique et de planification/programmation de déploiement des solutions (en particulier en matière d'infrastructures).

## 1. Économie normative : détermination de la trajectoire de la VTC

### 1.1. Taux de croissance de la VTC, Hotelling et incertitudes

La règle de Hotelling selon laquelle la VTC croît au rythme du taux d'actualisation résulte d'une approche coût-efficacité permettant d'évacuer la question de l'incertitude sur les dommages climatiques<sup>2</sup>. Si l'on suppose l'absence d'incertitude politique sur l'engagement des États à viser l'objectif 2 °C, la seule incertitude restante majeure est alors celle sur les technologies.

La règle de Hotelling constitue, dans ce cadre, un référentiel économique solide<sup>3</sup>. Il est sans doute souhaitable de ne s'en écarter qu'avec prudence. A minima, il apparaît nécessaire de pouvoir clairement justifier ces écarts sur des quantifications, même sommaires et transparentes.

---

<sup>2</sup> Dans le [rapport de la commission « Valeur tutélaire du carbone »](#) présidée par Alain Quinet en 2008 au Centre d'analyse stratégique (« rapport Quinet 2008 »), Olivier Godard (chapitre 5) montre néanmoins que même dans une approche coût-efficacité avec objectif 2 °C et budget carbone, l'approche coût-avantage devrait être mobilisée pour éliminer un usage trop précoce du budget carbone et la tentation d'un trop grand retard des efforts dans le temps, et dont la conséquence serait une arrivée précoce des dommages climatiques associés à 2 °C. Il nous semble qu'il s'agit là du meilleur argument de fond en faveur d'une contrainte *ex ante* de flux d'émissions dans le temps au détriment d'une seule contrainte de budget.

<sup>3</sup> Voir rapport Quinet 2008, §2.1 et §2.2 sur la règle de Hotelling et son adaptation à l'effet de serre. Le taux d'absorption naturelle du CO<sub>2</sub> (ou sa durée de vie naturelle dans l'atmosphère) peut apporter un correctif à la hausse dont la pérennité est sujette à débat entre climatologues (voir §3.1 sur les mécanismes d'absorption naturelle du CO<sub>2</sub>).



Le rapport Quinet de 2008 a abordé les raisons pour lesquelles il serait a priori envisageable d'amender la règle de Hotelling<sup>4</sup> : en premier lieu (et au-delà de l'incertitude sur le budget carbone) l'incertitude sur les coûts d'abattement futurs, en particulier sur les coûts à long terme en fin de période.

Christian Gollier et Dominique Bureau<sup>5</sup> ont étudié l'impact de ces incertitudes sur le rythme de croissance de la VTC. Leur prise en compte aboutit à un taux de croissance plus faible que le taux d'actualisation<sup>6</sup>. La quantification de tels effets demeure délicate. Par ailleurs, les impacts semblent, à ce stade, demeurer limités, en particulier si on envisage de disposer de politiques publiques de R & D complémentaires à des outils-prix pour gérer l'incertitude sur les technologies.

Des taux de croissance de la VTC supérieurs au taux d'actualisation ne paraissent pas justifiés au regard de la littérature économique. Ils risquent par ailleurs d'entraîner des effets pervers conduisant à retarder les investissements notamment en présence de contrainte budgétaire. Des pentes plus élevées de VTC posent, en définitive, la question d'un taux d'actualisation plus élevé pour traiter la question du CO<sub>2</sub>.

Deux éléments semblent dès lors être clé pour la détermination des trajectoires de VTC :

- les technologies susceptibles de faire le coût marginal d'abattement en fin de période (§1.2) ;
- le traitement de l'incertitude technologique de fin de période en distinguant, d'un côté, les outils permettant de s'assurer d'en disposer le moment venu, de l'autre, la VTC dont la fonction est de permettre le déploiement efficace des technologies antérieures (§2).

## 1.2. Technico-économie de la VTC à l'horizon 2050

De notre point de vue, il semble raisonnable et justifiable, vu d'aujourd'hui, que les coûts d'abattement en 2050 ne dépassent pas une fourchette comprise entre 500 et 600 €/t.

Plusieurs technologies sont a priori candidates pour voir leur coût marginal baisser à l'horizon 2050 :

- **CSS** : technologies de capture du CO<sub>2</sub> issues des centrales électriques ou des process industriels puis stockage géologique. Le coût pourrait se situer, si on prend

---

<sup>4</sup> Rapport Quinet 2008, §4.3 « Amendements à apporter à la règle de Hotelling ».

<sup>5</sup> Gollier C. (2018), « [On the efficient growth rate of carbon price under a carbon budget](#) », octobre, à paraître ; Dominique Bureau, présentation en Commission le 23 mars 2018.

<sup>6</sup> Taux d'actualisation pris ici au sens du taux de projet sans risque complété de la prime moyenne de risque « bêta = 1 ».

les données de l'AIE, en dessous de 100 €/t pour l'électricité et moins de 150 €/t pour l'industrie (voir Tableau 1 ci-dessous). Évidemment cela suppose des politiques de R & D et de démonstration adéquates. Ces valeurs relativement limitées ont tendance à favoriser le recours à cette technologie. Le facteur limitant est ici le volume de CO<sub>2</sub> effectivement stockable (enjeux d'acceptabilité inclus). Si ceux-ci sont incertains et sans doute limités en France, les potentialités en mer du Nord paraissent plus prometteuses. Une hypothèse de volumes de 100 Mt/an ne semble pas hors de l'épuration de ce point de vue. Il faut cependant veiller à un second facteur limitant, celui du rebouclage sur le puits carbone dans la mesure où seulement 90 % du CO<sub>2</sub> peut être effectivement capté à ce niveau de coût, le reste repartant dans l'atmosphère ;

- **BECCS** : la CCS appliquée à des centrales électriques avec biomasse permet de penser des émissions négatives, qui compenseraient les restes d'émissions « incompressibles » des divers secteurs. Les coûts de l'AIE se situent en dessous de 300 €/t. Les contraintes sont les mêmes que pour la CCS avec une contrainte puits carbone plus forte à cause du recours à la biomasse. Il est à noter que ces facteurs limitants de la BECCS peuvent poser problème au regard de l'objectif de 2 °C ou moins, dans la mesure où, au plan global, des émissions négatives apparaissent nécessaires après 2050 comme l'attestent de très nombreux scénarios. Raison de plus, selon nous, pour ne pas limiter les volumes disponibles au-delà de contraintes physiques avérées ;
- **H2 et Fuel-Cells (FC)** : vecteur hydrogène produit par électrolyse (et électricité décarbonée) pour des usages directs dans des piles à combustible (FC). C'est un moyen envisageable pour décarboner les émissions des usages non stationnaires, notamment les transports lourds grande distance. Les coûts apparaissent plus incertains, mais cette technologie paraît accessible à moins de 500 €/t avant 2050 pour la mobilité ;
- **PtG et PtL** : vecteur hydrogène recombinaison avec du CO<sub>2</sub> capté, pour reconstitution de gaz ou de liquides carbonés (*Power to Gas and Power to Liquid*). Il ne s'agit pas de technologies proprement futuristes : électrolyse, méthanation et Fischer-Tropsch sont bien connus depuis longtemps. Les coûts de ces technologies à l'horizon 2050 peuvent, selon les sources publiques, atteindre une fourchette de 450-550 €/t. C'est par exemple le cas de l'étude d'Agora Energiewende en prenant la fourchette basse de leurs estimations de coût sur production d'hydrogène et de méthane ou de carburant liquide (ce qui est compatible avec l'hypothèse d'un objectif de 2 °C partagé au niveau mondial) et avec un coût du CO<sub>2</sub> capté de l'ordre de 50 €/t. Si on prend une valeur de 100 €/t pour tenir compte des coûts de transport éventuels et pour se placer en ligne avec les coûts du captage de la CCS de l'AIE, on arrive à une

fourchette de 500-600 €/t qui pourrait constituer la fourchette « plafond » de la valeur d'abattement du CO<sub>2</sub> en 2050.

Cette valeur suppose que les volumes de CO<sub>2</sub> captés bouclent avec les volumes de méthane ou de liquides de synthèse produits. Ce devrait être le cas si les volumes de produits de synthèse demeurent effectivement contenus. Par ailleurs, il faut tenir compte de l'impact sur le puits carbone à cause des « pertes de CO<sub>2</sub> » à la capture. Là encore, si les volumes demeurent limités (ce qui devrait être le cas), l'impact devrait être compatible avec les incertitudes sur le niveau du puits carbone en 2050.

Dans l'hypothèse où le rebouclage sur le puits carbone se révèle problématique (peut-être après 2050, notamment, si on suit la vision selon laquelle ce puits pourrait diminuer), il faut recourir, pour couvrir ces 10 % à 5 % de « pertes » de CO<sub>2</sub>, à la captation directe dans l'air. Cette technologie, elle non plus, n'est pas une technologie inconnue puisqu'elle est déjà utilisée dans les sous-marins ou les laboratoires spatiaux depuis plusieurs décennies. Elle n'est toutefois pas développée à l'échelle industrielle nécessaire pour nos sujets. D'où des estimations de coûts encore très hétérogènes selon qu'elles émanent des quelques start-ups qui développent cette technologie ou de travaux académiques (voir Tableau 2 ci-dessous). En tout état de cause, une estimation du coût de capture directe plus stockage de 500-600 €/t apparaît comme une valeur à la fois prudente et justifiable de coût de cette technologie en 2050 qui permettrait, en dernière instance, de recourir au PtG ou au PtL si des contraintes sur les volumes de CCS disponibles apparaissaient.

Il apparaît, au final, qu'une fourchette de coût marginal d'abattement en 2050 située entre 500 et 600 €/t semble pouvoir être justifiée au regard de l'état des connaissances technologiques et de la littérature.

**Tableau 1 – Technologies supposées mature avant 2050**

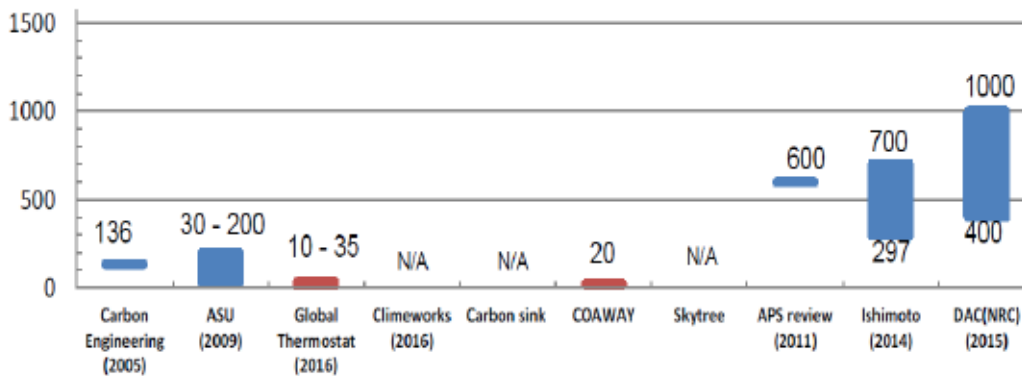
coûts unitaires : ordres de grandeur pour 2030-2040, pour des volumes limités à déterminer

technologie	coût du CO <sub>2</sub> évité	remarques	source	coût transport-stockage du CO <sub>2</sub> à ajouter. Selon AIE 10-30 \$/t
centrale électrique gaz + capture CO <sub>2</sub>	61 \$ / t	invest 1000 \$/kW, usage base (7500 h/an)	calculs à partir des données de coût d'investissement de l'AIE WEO 2017	
	166 \$ / t	fonctionnement en semi-base (2000 h/an)		
centrale électrique biomasse + capture CO <sub>2</sub>	250 \$ / t	émission négative (-875 g/kWh)	AIE ETP 2017. Figure 6.16	
industrie : cimenterie + capture CO <sub>2</sub>	55 - 70 \$ / t	oxy-combustion	AIE, 2018, Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry", page 39	
	90 - 150 \$ / t	capture post-combustion		
industrie : aciérie + capture CO <sub>2</sub>	60 - 80 \$ / t		AIE 2011, "Technology Roadmap CCS in Industrial Applications", page 19	

coûts de technologies prospectives et incertaines, horizon 2050

<b>Power to Gas</b> : H <sub>2</sub> par électrolyse puis méthanation pour usage chauffage (substitué au gaz naturel)	570 € / t	source de CO <sub>2</sub> pour capture à trouver	calculs à partir de données Agora Energie Wende 2018 <sup>6</sup>
<b>Power to Liquid</b> : H <sub>2</sub> par électrolyse puis transformation en carburant pour mobilité (substitué au pétrole)	470 € / t	(Agora Energie Wende : capture dans l'air)	

**Tableau 2 – Survey des coûts de capture de CO<sub>2</sub> directement dans l'air<sup>8</sup>**



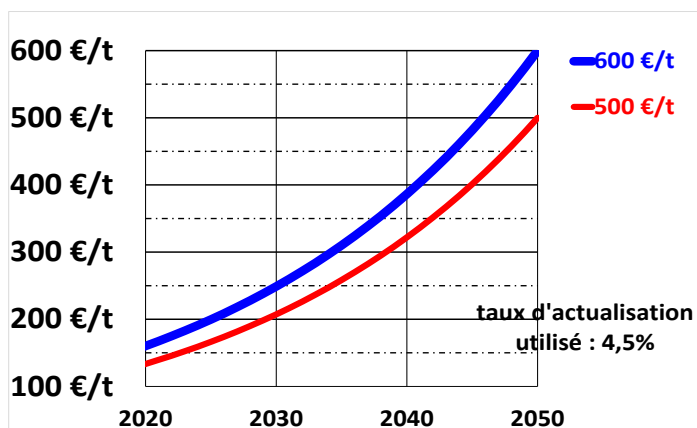
*Blue bars are from various publications. Red bars are from the webpages of the companies. The assumptions for cost estimates are not available in many case especially for the cost company claims.*

Avec cette fourchette de valeurs à long terme, la trajectoire suivant une règle de Hotelling et un taux d'actualisation de 4,5 % donne les valeurs ci-dessous.

<sup>7</sup> Voir Agora Energiewende (2018), *The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels*, Study, 16 April, Frontier Economics ; FVV (2016), *Renewables in Transport 2050*, Kraftstoffstudie II, Report 1086-2016 ; et nos propres hypothèse sur le coût de l'électricité intrante (80 €/MWh), un électrolyseur utilisé 8 000 heures/an, et absence de stockage de H<sub>2</sub>, actualisation à 4,5 %

<sup>8</sup> Source : Ishimoto Y. et al. (2017), « Putting costs of Direct Air Capture in context », *FCEA Working Paper Series*: 002, juin.

**Figure 1 –Trajectoire de VTC suivant une règle de Hotelling  
avec valeur terminale donnée en 2050**



En 2030, les valeurs correspondantes sont alors comprises entre 200 et 250 €/t. A cet horizon, des technologies que l'on peut déjà qualifier de matures devraient être massivement disponibles à des valeurs inférieures à 150 €, voire 100 €/t. En particulier les véhicules électriques pour le transport individuel ou utilitaire léger, ou les pompes à chaleur pour le bâtiment.

## 2. Usage de la VTC : économie institutionnelle et politiques publiques

De façon générale, il convient d'utiliser et combiner efficacement les différents instruments de politique publique (taxes, marchés de permis, normes, mécanismes de soutien R & D) pour le déploiement des technologies matures et pour l'orientation de la R & D. Ces instruments doivent pouvoir se référer à la trajectoire de la VTC d'où l'importance de lui conserver son caractère « optimal » pour identifier et justifier d'éventuels écarts.

### 2.1. Usage des valeurs initiales à court terme (2018-2025)

Au-delà d'une échéance homogène à la durée de vie résiduelle des équipements existants aujourd'hui, i.e. où l'on aura eu du temps pour adapter les équipements des entreprises et des ménages, un prix élevé du carbone aura un impact modéré sur les niveaux de revenu des agents (exemple :  $200 \text{ €/t} \times 1 \text{ t CO}_2/\text{hab}/\text{an} = 0,2 \text{ k€/an} = 0,5 \%$  du PIB/hab). Mais à court terme, les équipements carbonés existants sont fixés et l'offre d'équipements décarbonés alternatifs est insuffisante : un choc de prix du carbone a un effet revenu élevé et génère des questions de redistributions massives

(exemple :  $200 \text{ €/t} \times 4,4 \text{ t/hab/an} = 0,9 \text{ k€/an} > 2 \% \text{ du PIB/hab}$ , soit bien davantage pour certaines catégories de ménages ou d'entreprises).

En l'absence d'instruments de politiques publiques redistributives de « 1<sup>er</sup> rang », il est alors nécessaire de recourir à des instruments de « 2<sup>nd</sup> rang », i.e. amenant des distorsions de prix : la VTC ne peut sans doute pas être immédiatement reflétée dans une taxe. On peut imaginer, à titre d'exemple, que l'on utilise plusieurs instruments complémentaires, par exemple une taxe (fixée à un niveau plus bas que la VTC), des normes et des mécanismes de compensation de coûts échoués éventuels de telle sorte que la résultante de leurs effets exprimés en €/t de CO<sub>2</sub> évitée soit égale à la VTC selon un profil à la Hotelling.

## 2.2. Usage des valeurs à moyen terme (2030)

À cet horizon de temps, qui est encore partiellement un horizon de temps « des marchés » et des acteurs privés, il semble souhaitable à chaque fois que possible d'utiliser une valeur du carbone via la fiscalité ou des marchés de permis selon les cas, pour orienter le déploiement de technologies matures. Dans le secteur diffus (logement et transport des ménages en premier lieu), où les agents économiques sont moins sensibles aux anticipations de signal-prix, des instruments tels que les normes et subventions peuvent être préférés : la VTC est alors le bon moyen pour les choisir et les dimensionner de façon cohérente.

Cela est néanmoins insuffisant, et doit s'accompagner de mesures allant bien au-delà de cet horizon de temps et donc de l'horizon de temps des marchés. Nous pensons en particulier aux investissements d'infrastructures de long terme, à la structuration de l'industrie et au développement de filières industrielles. Dans cette perspective, l'intervention des pouvoirs publics doit compléter l'utilisation du signal-prix avec le même souci de cohérence avec la VTC aux différents horizons de temps considérés.

## 2.3. Usage à long terme (2040, 2050)

Compte tenu des délais de R & D dans les secteurs de l'énergie, des transports ou de l'industrie, disposer des technologies de long terme au bon moment et au bon niveau de coût suppose des actions dès aujourd'hui.

Les horizons de temps en jeu ne peuvent cependant pas être traités par les marchés à cause de leur incomplétude.

Il convient donc de pallier ces défaillances de marchés par d'autres instruments de politiques publiques (mécanismes de soutien R & D, normes, etc.), mieux à même d'internaliser la VTC à cet horizon.

Les États-Unis présentent de ce point de vue un exemple intéressant de politiques publiques de R & D complémentaires d'outils prix visant à déployer les technologies à court terme. Dans le domaine de l'énergie, l'administration Obama a ainsi mis en place un processus centré sur le Department Of Energy. Celui-ci rassemble à la fois les grands laboratoires américains et les industriels pour définir des roadmaps sur l'ensemble des technologies clés. En sont déduits des objectifs de coûts aux différents horizons de temps, des programmes de démonstrations pour descendre la courbe d'expérience et vérifier la tenue des roadmaps et, enfin, des volumes adéquats de soutien public. Ce type de politique illustre la complémentarité nécessaire entre signal-prix et *control and command* : il n'est pas nécessaire d'avoir un signal-prix très élevé et généralisé à l'ensemble de l'économie pour inciter au développement des technologies de demain dès lors qu'on met en place des processus spécifiques de monitoring des efforts de R & D du type de celui instauré aux États-Unis.







## COMPLÉMENT 16

# SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES ET ZÉRO ÉMISSIONS NETTES : UNE SYNTHÈSE DE « NET-ZERO EMISSIONS ENERGY SYSTEMS »<sup>1</sup>

---

Julien Bueb<sup>2</sup>

L'objectif de zéro émissions nettes nécessite de mobiliser l'intégralité des secteurs d'activité. Une trentaine de chercheurs versés dans les sciences techniques ont produit une analyse détaillée des technologies disponibles ou en développement par secteurs en vue d'une décarbonation des économies.

Les services énergétiques tels les secteurs des transports légers, de la production de chaleur ou de refroidissement et de l'éclairage peuvent être coûteux mais relativement simples à décarboner. La combinaison de plusieurs technologies connues ou en devenir – énergies renouvelables, ajustements de la demande d'électricité et énergies non renouvelables (nucléaire ou énergies fossiles avec CSC<sup>3</sup>) – devrait en permettre l'électrification et donc en éliminer les émissions de GES. Des augmentations substantielles de coût de l'énergie pourraient constituer l'entrave principale à la décarbonation de ces secteurs.

À l'inverse, des secteurs, liés à la civilisation moderne, induisent des émissions qu'il sera plus difficile d'éliminer complètement. Il s'agit du transport longue distance (routier,

---

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Département Développement durable et numérique, France Stratégie.

<sup>3</sup> CSC : captage et stockage du carbone.

aviation, maritime), de la production de matériaux intensifs en énergie et nécessaires pour les infrastructures (acier, ciment) ainsi que de l'offre de service électrique devant s'adapter aux variations de la demande. Ces secteurs représentaient 9,2 GtCO<sub>2</sub> en 2014, soit environ 27 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. Ils sont appelés à se développer du fait de la croissance économique, principalement de celle des pays en développement, et de la croissance démographique. Afin de concilier l'objectif zéro émission nette et la tendance haussière de l'activité des secteurs identifiés, les auteurs de l'étude présentent les opportunités technologiques, les écueils à leur développement et les domaines de recherche.

## 1. Aviation, transport longue distance sur route, transport maritime

Si les véhicules légers peuvent être aisément électrifiés, voire fonctionner à l'hydrogène, les contraintes liées aux volumes transportés et à la densité gravimétrique compliquent la décarbonation des secteurs aviation, transport longue distance sur route et transport maritime. Par exemple, à ce jour, les poids lourds électriques ne peuvent transporter que 60 % de la marchandise de son équivalent alimenté en carburants fossiles. Pour pallier à ces difficultés, plusieurs pistes sont envisagées :

- Le développement de l'hydrogène comme carburant d'une pile à combustible est prometteur mais encore loin du stade industriel. Il a également un coût initial élevé (électrolyseurs, pompe à chaleur (PAC), etc.).
- Le développement de l'ammoniac (à partir également d'hydrogène électrolytique) comme carburant, mais sa faible densité ne permet pas d'envisager de longues distances.
- Les biocarburants : leur partie prenante au cycle du carbone rend complexes leur usage et surtout le passage à une échelle de production de masse. De plus, ils entrent en concurrence avec d'autres ressources pour l'usage de l'eau, des sols, d'engrais, etc.
- Les hydrocarbures synthétiques : réaction entre le monoxyde de carbone et l'hydrogène par le procédé de Fischer-Tropsch, ces hydrocarbures sont une piste intéressante car maîtrisée. Les coûts de l'électrolyse et de la capture de carbone pour fabriquer le monoxyde de carbone restent à ce jour l'entrave principale au développement de cette filière.
- Les carburants solaires, créés à partir d'énergie solaire directe, d'eau comme source d'hydrogène, de CO<sub>2</sub> et d'un catalyseur. Le procédé n'a pas encore dépassé le stade de la preuve en laboratoire.

## 2. Les matériaux de structure

Le développement économique et l'industrialisation sont historiquement liés à la construction d'infrastructures. Décarboner ce secteur nécessite donc des changements majeurs dans les procédés manufacturés en utilisant des matériaux alternatifs ou en mobilisant la technologie CSC :

- L'acier : la fabrication de l'acier nécessite de hautes températures. Il s'agit donc ici d'améliorer l'efficacité énergétique des processus de fabrication et de diminuer les besoins en acier. Les alternatives partielles pour la production de chaleur sont la technologie actuelle du four à arc à partir d'électricité décarbonée, l'usage de la biomasse et de l'hydrogène.
- Le ciment : peu d'alternatives existent même si elles sont complémentaires ; soit le système de production du ciment connaît des modifications profondes, soit des substituts à ce matériau sont utilisés ou découverts.

## 3. Haute fiabilité du système électrique

À ce jour, environ 12 % des émissions mondiales de GES sont dues aux émissions des centrales d'appoint des réseaux électriques. Ces centrales permettent d'éviter des ruptures de charge du réseau électrique. Le principal défi d'un système électrique à haut rendement de services et neutre en carbone est d'être flexible, évolutif (ce que permettent les centrales gaz aujourd'hui, mais avec des émissions de GES).

- Production flexible : il est nécessaire de mettre en place et donc de rémunérer des actifs qui fonctionneraient moins de 20 % du temps. Équiper les centrales gaz de CSC permettrait de répondre au défi de la fluctuation de la demande d'électricité. Le coût fixe du CSC pour un si faible usage annuel reste néanmoins à ce jour très élevé. L'option nucléaire pourrait être une option de flexibilité si, comme dans le cas des centrales fossiles équipées de CSC, une amélioration de l'efficacité (utilisation de la vapeur, amélioration du débit réfrigérant, etc.) et une baisse significative des coûts<sup>4</sup> s'opéraient quelle que soit la génération des réacteurs.
- Le stockage de l'électricité peut être réalisé par énergie gravitaire, énergie électrochimique, énergie cinétique ou énergie thermique.
  - Le stockage d'énergie gravitaire par pompage d'eau et restitution en hydroélectricité représente 95 % du stockage actuel de l'électricité dans le

---

<sup>4</sup> À ce jour, étant donné les coûts de la filière, ce facteur de production est utilisé à plus de 90 % (au niveau mondial).

monde<sup>5</sup>). Les contraintes sont la disponibilité de l'eau, de réservoirs adaptés, d'une opposition sociale et environnementale. De plus, l'usage de ces stations peut être lié à des considérations non énergétiques comme la protection contre les inondations, des usages agricoles ou de loisirs.

- Le stockage électro-chimique par batteries a l'attrait d'être dans une tendance baissière de coûts, mais reste cantonné à du stockage infra-journalier.
  - Le stockage électrochimique par hydrogène renvoie à la production par électrolyse d'hydrogène stockable. Celui-ci peut être ensuite soit directement brûlé dans une pile à combustible, voire dans une turbine, soit inséré en petite quantité dans un réseau de gaz, soit enfin recombinaison avec du carbone (à partir d'une source de CO<sub>2</sub>) pour faire du carburant liquide (« power to liquid ») ou du méthane (« power to gas ») utilisables dans leurs usages traditionnels (mobilité ou chauffage). Ces procédés, aujourd'hui chers, pourraient l'être un peu moins demain grâce à l'industrialisation du secteur.
  - Le stockage thermique passe par le vecteur « air comprimé » (travail de compression fourni par l'électricité). Le stockage de l'air est réalisable dans des formations géologiques, des réservoirs subaquatiques ou de surface. L'efficacité des techniques connues à ce jour sont inférieures à 50 % de l'énergie utilisée. D'autres, à développer, présenteraient des rendements à plus de 75 %. Les durées de stockage sont de l'ordre de deux ou trois jours au maximum. Les perspectives de baisses de coûts sont faibles.
  - Le stockage d'énergie cinétique utilise les volants d'inertie. La technologie est relativement mature mais reste cantonnée au stockage sur quelques secondes ou minutes, utile pour le maintien de fréquence du réseau d'électricité.
- Gérer la demande : les auteurs soulignent l'importance d'agir sur la demande d'électricité afin de mieux la corrélérer aux variations de l'offre. En effet, lors de pics de demande, les centrales les plus flexibles, soit celles à charbon ou au gaz, sont sollicitées. Diminuer la demande et la lisser sur un pas de temps journalier et saisonnier est nécessaire pour atteindre la neutralité carbone

---

<sup>5</sup> En oubliant ici l'hydroélectricité des barrages de lacs, qui représente aussi une forme de stockage (à partir d'apports naturels), dans des volumes autrement plus importants.

## 4. La gestion du carbone

Distinct du CSC, la gestion du carbone de l'atmosphère sera vraisemblablement une activité importante pour que les émissions nettes soient nulles. L'afforestation ou la reforestation comme les technologies de captage de GES dans l'atmosphère permettront de générer des émissions négatives. La capture du carbone dans l'air ambiant pourrait permettre de le synthétiser en carburant (recombiné avec de l'hydrogène : voir plus haut) ou être séquestré. La capture du carbone issu de la combustion de la biomasse pourrait être soit séquestré, soit recyclé pour produire davantage de carburants. Toutefois, les contraintes d'usages des sols, de l'eau ou de gestion des ressources alimentaires limitent le potentiel des puits anthropiques. Les défis principaux pour la capture dans l'atmosphère relèvent des coûts pour produire les capteurs et les structures appropriées. Il existe de plus une incertitude sur la fiabilité de long terme de la séquestration et des risques de rejet.

\* \* \*

La combinaison des technologies connues pourrait conduire à éliminer les émissions de la plupart des services et des processus énergétiques. Des augmentations substantielles de coûts sont néanmoins les barrières actuelles à la réduction des émissions dans chaque secteur. Dans quelques cas, l'innovation et son déploiement peuvent être espérés pour réduire les coûts et créer de nouvelles opportunités. Les changements les plus rapides dépendent de la coordination des opérations entre les secteurs énergétiques et industriels, laquelle pourrait permettre d'accroître la rentabilité des investissements. Pour que cette coordination soit facilitée, il est important que les pouvoirs publics s'impliquent. Les auteurs préconisent d'agir sur deux filières : la recherche dans des technologies et des processus difficiles à décarboner et la recherche dans l'intégration de ces systèmes afin de fournir des produits et des services fiables, efficaces et peu coûteux. Les auteurs insistent également sur le besoin de ne pas seulement agir sur l'offre. Ils préconisent ainsi de réduire la demande énergétique par « modération »<sup>6</sup> et par une efficacité accrue dans l'usage des matériaux et de l'énergie.

---

<sup>6</sup> Cette « modération » renvoie à la notion utilisée en France de sobriété.





## COMPLÉMENT 17

# LE RÔLE DES ÉMISSIONS AGRICOLES DE GAZ À EFFET DE SERRE DANS L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF FRANÇAIS DE NEUTRALITÉ CARBONE

---

Stéphane De Cara, Laure Bamière et Pierre-Alain Jayet<sup>1</sup>

### Introduction

Atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 nécessitera des transformations profondes dans tous les secteurs de l'économie. Ces transformations concernent au premier chef les secteurs aujourd'hui très consommateurs d'énergie fossile (transports, résidentiel, production électrique, etc.).

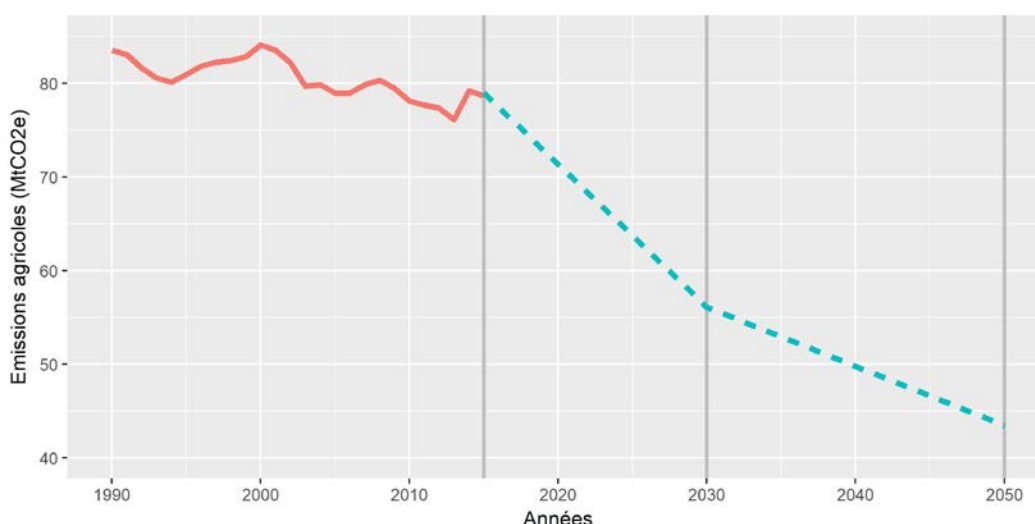
Néanmoins, le nécessaire effort de réduction des émissions fossiles ne doit pas occulter le rôle des autres secteurs de l'économie, et en particulier celui du secteur des terres (agriculture, forêt et usages des sols). Les inventaires du Citepa (2017) indiquent que les activités agricoles contribuent à hauteur d'environ 20 % aux émissions brutes de gaz à effet de serre françaises. Une des spécificités de ces émissions est qu'elles sont composées de gaz autres que le CO<sub>2</sub> (méthane, CH<sub>4</sub>, et protoxyde d'azote, N<sub>2</sub>O). Par ailleurs, les usages des sols (forestiers, agricoles, urbains) et les changements dans ces usages (déforestation, afforestation, retournement de prairies, artificialisation, etc.) jouent un rôle important dans l'évolution des stocks de carbone contenus dans les sols et la biomasse aérienne. Le puits net français lié aux usages des sols, à leurs changements et à la forêt (UTCF) est estimé à environ 36 MtCO<sub>2</sub>e en 2015 (Citepa, 2017).

---

<sup>1</sup> Économie Publique, INRA, AgroParisTech, université Paris-Saclay, F-78850 Thiverval-Grignon.

Ce texte se concentre sur les potentiels et les coûts d'atténuation dans le secteur agricole français. La trajectoire des émissions agricoles (hors usages des sols et utilisation d'énergie fossile) retenue par la commission Quinet à la lumière des derniers travaux sur la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) implique une réduction d'environ 45 % en 2050 par rapport à leur niveau de 2015, avec des émissions agricoles passant ainsi d'environ 79 à 43,5 MtCO<sub>2</sub>e (voir Figure 1). Dans le même temps, le puits net UTCF d'une capacité actuelle de 36 MtCO<sub>2</sub>e, s'accroîtrait pour atteindre 75 à 95 MtCO<sub>2</sub>e selon les hypothèses retenues. En 2050, les émissions agricoles représenteraient entre 45 % et 60 % des émissions brutes françaises (hors puits UTCF).

**Figure 1 – Évolution des émissions agricoles (hors usages des sols et hors utilisation d'énergie fossile) depuis 1990 et trajectoire à l'horizon 2050**



Note : les émissions agricoles historiques (1990-2015) sont issues de l'inventaire français (CITEPA, 2017). La trajectoire 2015-2050 est celle retenue par la commission Quinet sur la base des travaux préparatoires à la SNBC (mai 2018).

Ces quelques éléments illustrent en creux l'importance de l'effort qui devra être fourni par les autres secteurs de l'économie pour atteindre la neutralité carbone. La question devient alors : le secteur agricole est-il en mesure de « soulager » les autres secteurs de l'économie en offrant des réductions d'émissions supplémentaires à des coûts compétitifs ?

Afin d'apporter un éclairage quantitatif à cette question, ce texte mobilise les évaluations disponibles des coûts et des potentiels d'atténuation dans le secteur agricole français et les met en regard avec la trajectoire de réduction assignée à ce secteur présentée à la Figure 1. Ce texte vise également à fournir quelques éléments de cadrage sur les méthodes utilisées pour évaluer les coûts et les potentiels d'atténuation et à discuter les



défis à relever pour aller vers des évaluations qui intègrent émissions agricoles et émissions fossiles de manière plus systématique.

## 1. Évaluation des potentiels et coûts d'atténuation dans le secteur agricole : quelques éléments de cadrage méthodologique

La théorie standard de l'économie de l'environnement nous enseigne que le niveau socialement optimal d'atténuation résulte de la confrontation du coût marginal d'atténuation et du bénéfice marginal tiré de la réduction des émissions. Même dans une optique coût-efficacité se contentant d'une cible d'émissions à atteindre au meilleur coût (et donc ne nécessitant pas une évaluation explicite des bénéfices environnementaux), le coût marginal d'atténuation reste une information essentielle qui détermine la répartition efficace de l'effort d'atténuation entre les agents ou les secteurs. Or, les coûts marginaux d'atténuation ne sont en général pas directement observables<sup>2</sup>. Évaluer ces coûts requiert donc de recourir à des modèles.

À cette fin, plusieurs stratégies ont été développées dans la littérature. Vermont et De Cara (2010) établissent une typologie de ces stratégies en trois grandes catégories :

- les approches qualifiées d'« ingénieur » qui visent à évaluer les potentiels et les coûts d'atténuation associés à un ensemble d'options techniques d'atténuation et à les classer par coût d'atténuation croissant ;
- les modèles d'offre qui décrivent le comportement microéconomique des agriculteurs (en termes d'allocation des surfaces entre les différentes cultures, d'alimentation et de conduite du troupeau, etc.) en tenant compte des conséquences de leurs décisions en termes d'émissions. Dans ces modèles, le coût marginal d'atténuation s'interprète comme un coût d'opportunité ;
- les modèles d'équilibre (général ou partiel) qui représentent le secteur à un niveau souvent plus agrégé mais qui tiennent compte des conséquences des modifications induites par la réduction des émissions sur les marchés, les prix et les échanges.

La méta-analyse menée par Vermont et De Cara (2010) montre que le choix de l'une ou l'autre de ces approches a des conséquences importantes et significatives sur l'évaluation du potentiel d'atténuation qui peut être atteint à une valeur donnée des émissions.

---

<sup>2</sup> C'est notamment vrai lorsqu'aucune disposition n'est en place pour inciter les agents à réduire leurs émissions comme c'est le cas dans le secteur agricole.

Au-delà des différences d'ordre méthodologique (résolution, couverture spatiale, hypothèses sous-tendant le scénario de référence, prise en compte des aspects dynamiques, etc.), une différence fondamentale tient aux leviers d'atténuation dont chacune de ces approches peut rendre compte.

Frank *et al.* (2018) proposent une décomposition de l'atténuation en trois leviers : techniques, structurels et liés à la demande. Les approches de type « ingénieur » sont les mieux adaptées pour capturer les leviers techniques d'atténuation, i.e. ceux liés à l'adoption de mesures qui ne sont pas nécessairement déployées en l'absence d'incitations à réduire les émissions. En revanche, elles ne rendent pas compte des changements structurels ou liés à la demande. Les modèles microéconomiques d'offre permettent de capturer les changements structurels au niveau de l'exploitation (changements dans l'allocation des surfaces entre les cultures, taille du cheptel, alimentation des animaux) tout en tenant compte des contraintes technico-économiques qui s'appliquent à cette échelle. Enfin, les modèles d'équilibre capturent les impacts sur les prix et les marchés et donc les modifications induites sur la demande. Ils sont également capables de rendre compte des potentiels effets de déplacement des émissions (fuite ou *leakage*) qui peuvent survenir si la politique d'atténuation n'est que partiellement mise en œuvre (par exemple dans un seul pays). Le contenu technique de ces modèles est en général moins riche que dans les deux premières approches.

Le message essentiel porté par les résultats de Frank *et al.* (2018) est qu'aucun de ces leviers pris individuellement ne permet d'atteindre l'objectif de deux degrés (soit une atténuation des émissions agricoles mondiales d'environ 1 et 2,5 GtCO<sub>2</sub>e en 2030 et 2050, Wollenberg *et al.*, 2016).

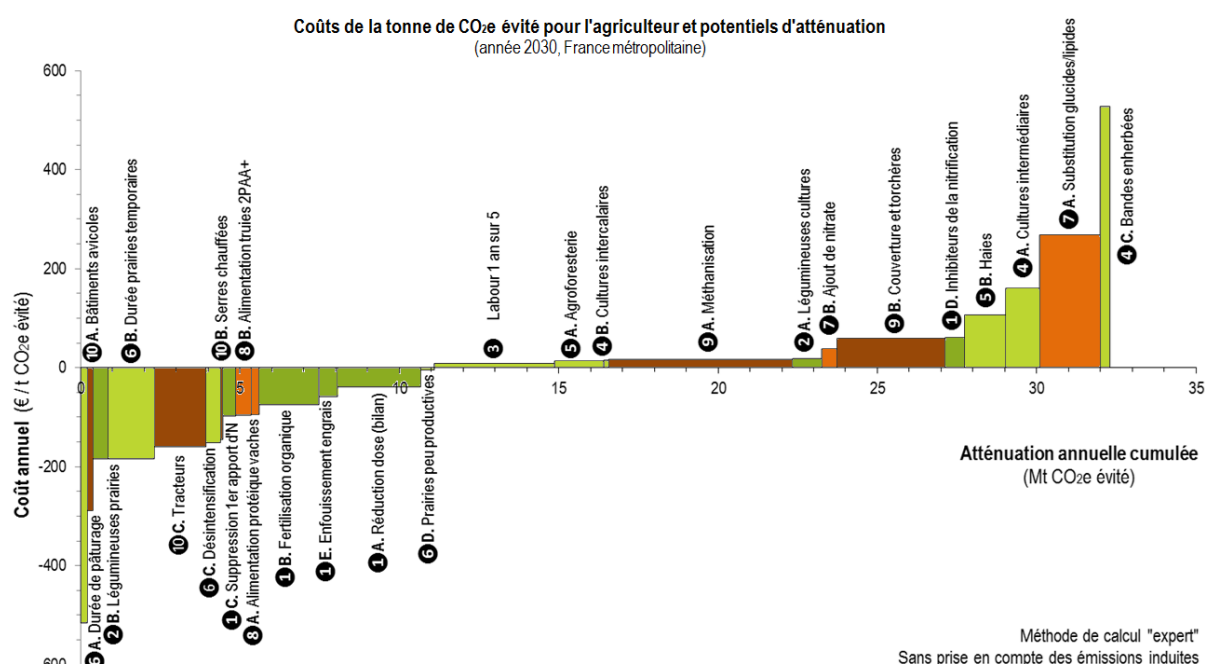
## 2. Évaluation des potentiels et des coûts dans le secteur agricole français par une approche de type « ingénieur »

Nous nous appuyons tout d'abord sur une étude menée par l'INRA (Pellerin, Bamière *et al.*, 2013 ; Pellerin *et al.*, 2017). Celle-ci s'inscrit dans la démarche de type « ingénieur » décrite plus haut. Dans cette étude, 10 actions, déclinées en 26 options d'atténuation, ont été analysées. Le choix de cette liste a fait l'objet d'un examen approfondi par le groupe d'experts de l'étude qui a retenu les actions à la fois suffisamment documentées dans la littérature et susceptibles d'offrir des potentiels d'atténuation conséquents sans remettre en cause significativement le potentiel productif français ni engendrer des effets indésirables pour d'autres considérations environnementales ou sociétales.

Chaque option a ensuite été évaluée sur quatre dimensions : (i) l'assiette (surface, cheptel animal, etc.) sur laquelle l'option peut être déployée ; (ii) la dynamique d'adoption

des options considérées entre aujourd'hui et 2030 ; (iii) le potentiel d'atténuation unitaire (par unité d'assiette) ; et enfin (iv) le coût unitaire d'adoption associé. Les actions sont ensuite classées par coût d'atténuation croissant (€/tCO<sub>2</sub>e, axe vertical sur la Figure 2), et cette valeur est mise en regard avec le potentiel d'atténuation cumulé (MtCO<sub>2</sub>e, axe horizontal sur la Figure 2).

**Figure 2 – Potentiel d'atténuation (en abscisse) et coût d'atténuation (en ordonnée) des 26 options d'atténuation analysées par Pellerin, Bamière *et al.* (2013)**



Les résultats synthétisés dans la Figure 2 indiquent un potentiel total d'environ 32 MtCO<sub>2</sub>e en 2030, dont environ un tiers correspond à des actions à « coût négatif » (pour lesquelles l'atténuation est concomitante avec une augmentation du revenu et/ou une baisse des coûts).

L'interprétation de ces résultats appelle des précautions importantes. Tout d'abord, l'évaluation du potentiel total n'est pas directement comparable aux émissions présentées à la Figure 1. En effet, le périmètre retenu par Pellerin, Bamière *et al.* (2013) inclut les effets des actions sur les stocks de carbone dans les sols agricoles (haies, labour réduit, agroforesterie, gestion des prairies, etc.) et sur la consommation d'énergie fossile dans le secteur agricole. Ces sources et puits ne sont pas intégrés dans les émissions agricoles représentées dans la Figure 1. Par ailleurs, les inventaires d'émissions dans leur forme actuelle ne sont pas en mesure de rendre compte de l'effet de certaines actions d'atténuation (par exemple ajout d'additifs dans la ration). Si l'on se restreint aux émissions strictement agricoles (hors puits UTCF et émissions liées à la

consommation d'énergie fossile) qui entrent effectivement dans le périmètre de comptabilisation des inventaires actuels, le potentiel d'atténuation total serait divisé par environ trois pour s'établir à environ 10 MtCO<sub>2e</sub> (Pellerin, Bamière *et al.*, 2013, p. 82).

En outre, les résultats présentés à la Figure 2 ont été obtenus sous un certain nombre d'hypothèses qu'il convient d'explicitier. Celles sous-tendant la situation de référence – correspondant à la situation de l'agriculture française en 2010 – sont notamment importantes. Les conditions économiques (prix des produits et des intrants notamment) qui prévalaient à cette date sont supposées constantes sur l'horizon considéré (2030). De plus, un parti pris important de l'étude était de ne pas considérer les actions susceptibles d'altérer significativement le potentiel productif agricole. La surface agricole totale, sa répartition entre grandes activités (cultures, prairies), la taille du cheptel et les rendements sont ainsi considérés comme fixes (ou variant dans des proportions limitées).

Deux autres hypothèses sont importantes pour l'interprétation des résultats. La première, inhérente à la méthode retenue qui consiste à évaluer indépendamment chaque action d'atténuation, est que la concurrence potentielle entre les actions est ignorée. La deuxième est que le raisonnement est mené à une résolution nationale (France métropolitaine), et donc peut masquer la variabilité des coûts et des potentiels d'atténuation à un niveau plus fin. Les implications de ces deux hypothèses ont été explorées dans le projet BANCO (Bamière *et al.*, 2017).

Les travaux préparatoires de la SNBC qui ont conduit à la trajectoire présentée dans la Figure 1 ont considéré que l'ensemble des actions analysées par Pellerin, Bamière *et al.* (2013) seront complètement déployées à l'horizon 2030. Les marges de manœuvre disponibles pour aller au-delà de cette trajectoire sont donc à chercher ailleurs.

### **3. Évaluation des potentiels et des coûts dans le secteur agricole français par un modèle microéconomique d'offre agricole**

Nous nous tournons vers les évaluations des coûts d'atténuation issues d'un modèle microéconomique de l'offre agricole européenne (AROPA<sub>J</sub>). Ce modèle a été utilisé pour des évaluations des liens entre agriculture et effet de serre au niveau français (De Cara et Jayet, 2000 ; De Cara et Thomas, 2008 ; Forslund *et al.*, 2009) et européen (De Cara *et al.*, 2005 ; De Cara et Jayet, 2011 ; De Cara *et al.*, 2018).

### 3.1. Présentation succincte du modèle

Le modèle AROPAj est un modèle microéconomique d'offre qui fonctionne sur une base annuelle et qui décrit le comportement économique d'un ensemble d'exploitations représentatives en matière d'allocation des sols et de gestion des activités d'élevage.

La principale source de données est le RICA européen<sup>3</sup>, qui fournit des informations comptables, économiques et structurelles sur environ 80 000 exploitations professionnelles enquêtées en Europe (un peu moins de 8 000 en France). Une classification des données du RICA permet de construire des exploitations représentatives (entre 159 et 170 exploitations représentatives pour la France selon l'année de calibrage) comme des regroupements d'exploitations similaires en termes de localisation (région, altitude), de taille et d'orientation technico-économique. Cette typologie couvre à la fois des exploitations spécialisées dans des activités animales et végétales (à l'exclusion des exploitations spécialisées dans l'horticulture, le maraîchage ou la viticulture) et des exploitations mixtes polyculture-élevage.

À chaque exploitation représentative est associé un modèle microéconomique de maximisation de la marge brute sous contraintes agronomiques (rotations des cultures, satisfaction des besoins nutritionnels des animaux, équilibre démographique du troupeau, etc.), politiques (par exemple seuils associés à l'éligibilité à certaines aides de la PAC), de disponibilité des ressources (terre, taille des bâtiments d'élevage, etc.). Les principales variables de choix pour chaque exploitation représentative sont (i) la surface allouée à chaque culture (parmi 24 cultures annuelles, ainsi que prairie temporaire ou permanente), (ii) la taille du cheptel dans chaque catégorie animale (troupeau bovin décomposé en laitier et viande et par classe d'âge et de sexe, ovins, caprins, porcins, volailles) et (iii) l'alimentation animale (par exemple le partage entre alimentation produite sur la ferme et alimentation achetée, entre fourrages et concentrés) étant donné les besoins en énergie et en protéines de chaque catégorie animale et les contraintes d'encombrement qui lui sont spécifiques. La plupart des paramètres d'entrée du modèle (prix des produits, charges variables par culture, rendements, etc.) sont estimés à partir des données du RICA et sont spécifiques à chaque exploitation représentative. Les paramètres pour lesquels les observations individuelles sont manquantes sont calibrés au niveau de chaque exploitation de sorte que le modèle reflète la situation observée telle que décrite par les données du RICA.

Le modèle couvre les principales sources d'émissions en méthane (CH<sub>4</sub>) et en protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) directement imputables aux activités agricoles : émissions de N<sub>2</sub>O dues à la gestion des sols agricoles et des effluents d'élevage, et émissions de CH<sub>4</sub> dues à la fermentation entérique, à la gestion des effluents d'élevage et à la riziculture. Il exclut les

---

<sup>3</sup> Réseau d'information comptable agricole, voir <http://ec.europa.eu/agriculture/rica/>.

émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation d'énergie fossile dans le secteur agricole ou à certains amendements (chaux, urée) et les émissions liées aux usages des sols et à leurs changements. Le périmètre des émissions couvertes par le modèle est donc comparable à celui utilisé dans la trajectoire d'émissions présentée à la Figure 1. Les émissions sont calculées à partir des facteurs d'émissions reportés par chaque pays dans les inventaires nationaux. Ces facteurs d'émissions sont reliés aux variables d'activité du modèle, de sorte que les émissions de chaque exploitation représentative sont endogènes. Les émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O sont converties en tCO<sub>2</sub>e sur la base des PRG à 100 ans (25 pour le CH<sub>4</sub>, 298 pour le N<sub>2</sub>O).

On utilise ici les résultats d'un travail en cours au niveau européen (Isbaïou *et al.*, 2018), desquels sont extraites les simulations concernant les exploitations françaises. La version du modèle utilisée a la particularité d'être calibrée indépendamment sur six années de données RICA (de 2007 à 2012) afin de capturer l'influence des variations de contexte (notamment en termes prix des produits et des intrants qui ont connu de fortes variations durant cette période) sur les résultats.

Lorsqu'une valeur tutélaire est introduite, chaque exploitation ajuste le niveau de ses activités jusqu'à ce que son coût marginal d'atténuation soit égal à cette valeur. Les leviers d'atténuation tiennent à la réallocation des surfaces entre les différentes cultures au sein de chaque exploitation (et donc les quantités d'engrais azotés), à des modifications dans l'alimentation animale (qui affectent les émissions liées à la fermentation entérique et aux effluents d'élevage), et à la réduction de la taille et de la composition du cheptel. Pour tenir compte de l'inertie dans l'ajustement du nombre d'animaux, la variation des effectifs bovins est limitée à +/-15 % du capital initial dans les simulations.

En faisant varier la valeur de l'action pour le climat et en la mettant en regard de la réduction d'émission correspondante, on décrit ainsi point par point la courbe de coût marginal d'atténuation. Comme tous les agents font face à la même valeur, l'effort d'atténuation est, par construction, réparti de manière efficace.

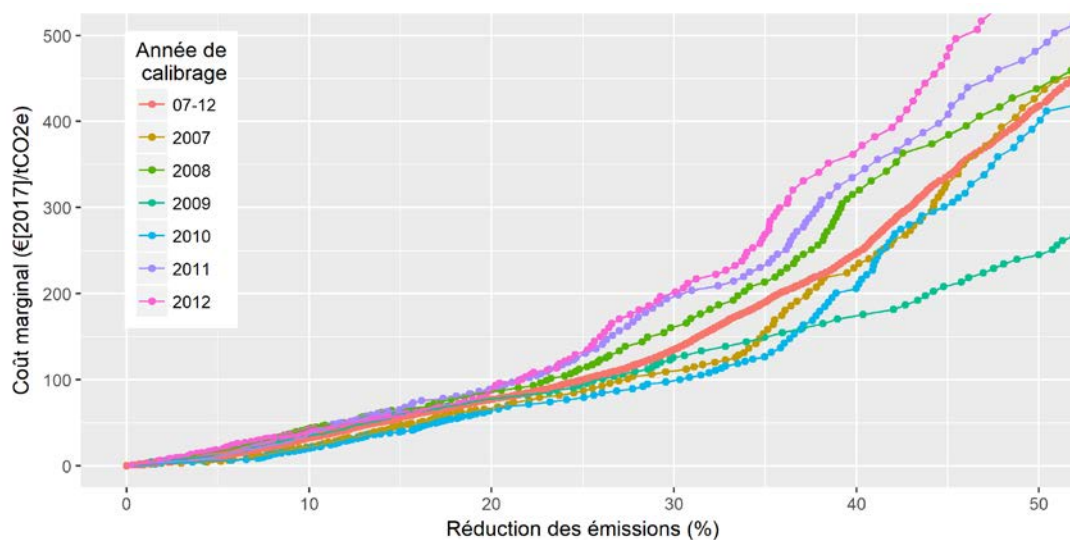
Par rapport à l'approche présentée succinctement dans la section 2 ci-dessus, le périmètre de comptabilisation est plus proche de celui retenu dans la trajectoire des émissions agricoles présentée à la Figure 1. Les leviers d'atténuation disponibles sont différents (et, dans une large mesure, complémentaires) des leviers techniques explorés dans Pellerin, Bamière *et al.* (2013). En outre, la structure du modèle rend compte de manière endogène de la concurrence entre les différents leviers d'atténuation à la résolution de chaque exploitation type. En revanche, comme dans Pellerin, Bamière *et al.* (2013), la référence est statique et correspond à la situation sans valeur de l'action pour le climat pour l'année de calibrage considérée et les prix sont supposés exogènes et constants. Les évaluations présentées ne tiennent donc pas compte des éventuelles rétroactions des prix (via les marchés) sur les coûts marginaux.

### 3.2. Courbes de coût marginal d'atténuation du secteur agricole français

Pour chaque année de calibrage, une valeur de l'action pour le climat de 0 à 10 000 €/tCO<sub>2</sub>e (200 valeurs, par pas variable) est introduite. Afin de comparer des valeurs qui correspondent à différents systèmes de prix, tous les niveaux de valeur de l'action pour le climat sont exprimés en €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2</sub>e en utilisant le déflateur du PIB entre 2007 et 2017<sup>4</sup>. Les couples (taux de réduction, valeur de l'action pour le climat) ainsi obtenus pour chacune des six années de calibrage (ainsi que pour le cumul d'atténuation sur l'ensemble de la période) sont représentés sur la Figure 3.

On note l'influence importante de l'année de calibrage sur la valeur de l'action pour le climat nécessaire pour atteindre un même taux de réduction des émissions. Ces différences peuvent être expliquées en partie par les fluctuations importantes des prix des produits et des intrants durant la période 2007-2012 qui affectent le coût d'opportunité de réduction des émissions au niveau de chaque exploitation. On retrouve ici l'influence des prix sur le niveau des émissions agricoles françaises mise en évidence économétriquement par Chakir *et al.* (2017). Les différences entre les niveaux et les pentes des courbes de coût marginal d'atténuation sont particulièrement notables pour des taux de réduction des émissions supérieurs à 30 %.

**Figure 3 – Courbes de coût marginal d'atténuation pour le secteur agricole français**



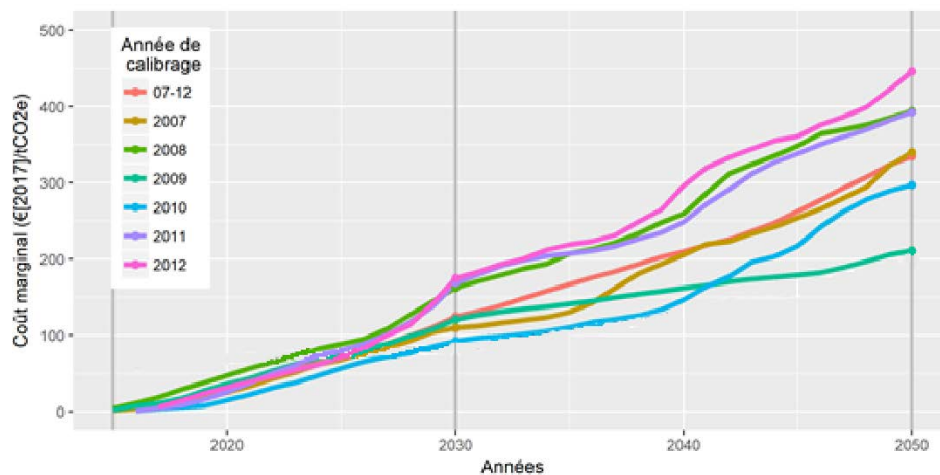
Note : chaque point correspond à une simulation pour un niveau de valeur de l'action pour le climat (en €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2</sub>e) et une année de calibrage. Le taux d'atténuation est calculé par rapport aux émissions de l'année de calibrage ou au cumul des émissions durant la période 2007-2012.

<sup>4</sup> <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010546576#Telechargement>.

### 3.3. Des quantités aux prix

Pour traduire les implications de la trajectoire d'émissions présentée à la Figure 1 en termes de coût marginal d'atténuation, il est nécessaire de tenir compte de l'évolution des émissions entre chaque année de calibrage et l'année 2015. Les taux obtenus (présentés dans la Figure 1) sont ensuite projetés sur la courbe de coût marginal associée à chaque année de calibrage. On en déduit ainsi (par interpolation linéaire entre chaque point de simulation) le coût marginal correspondant pour chaque année entre 2015 et 2050. Les trajectoires de coût d'abattement qui en résultent sont représentées sur la Figure 4.

**Figure 4 – Trajectoire du coût marginal d'atténuation des émissions agricoles impliquée par le respect de la trajectoire des émissions agricoles présentée à la Figure 1**



Pour chaque année de calibrage, la trajectoire de coût marginal croît de manière relativement linéaire dans le temps. La rupture de pente autour de 2030 correspond au ralentissement de la baisse des émissions dans la trajectoire présentée à la Figure 1. Ce ralentissement compense en partie l'accroissement plus rapide des courbes de coûts marginal au-delà d'un taux d'atténuation de 30 % (voir Figure 3).

Les différences marquées de niveaux entre les courbes de coût marginal selon l'année de calibrage se traduisent par des trajectoires de prix contrastées. Le coût marginal d'atténuation s'établit ainsi dans un intervalle allant de 90 à 175 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2030 et de 210 à 450 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2050. Le coût marginal associé au cumul 2007-2012 (gommant ainsi les variations conjoncturelles) est de 124 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2030 et de 335 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2050 (voir Tableau 1). On note également que, à partir de 2030 et quelle que soit l'année de calibrage, les coûts marginaux obtenus sont plus élevés que les valeurs issues de la commission Stern-Stiglitz.



**Tableau 1 – Coût marginal d'atténuation des émissions agricoles en 2030 et 2050**

Année de calibrage	Émissions de l'année de calibrage	2030		2050	
		(cible 56,1 MtCO <sub>2e</sub> , - 29 % / 2015)		(cible 43,5 MtCO <sub>2e</sub> , - 45 % / 2015)	
		Taux de réduction à atteindre	Coût marginal	Taux de réduction à atteindre	Coût marginal
	(MtCO <sub>2e</sub> )	(%)	(€ <sub>2017</sub> /tCO <sub>2e</sub> )	(%)	(€ <sub>2017</sub> /tCO <sub>2e</sub> )
2007	79,9	29,8	110	45,6	340
2008	80,3	30,2	162	45,9	394
2009	79,5	29,4	121	45,3	211
2010	78,1	28,2	92	44,4	297
2011	77,7	27,8	168	44,1	392
2012	77,4	27,5	175	43,8	447
2007-2012	78,8	28,8	124	44,9	335

### 3.4. Limites

Les résultats présentés ci-dessus sont fondés en grande partie sur l'exploitation des courbes de coût marginal d'atténuation obtenues avec un modèle microéconomique d'offre. Ils sont donc contingents aux hypothèses qui sous-tendent ce modèle.

Tout d'abord, comme pour tout modèle, les résultats sont fondés sur des estimations des paramètres d'entrée (techniques, économiques, politique agricole) calibrés sur des situations observées. Les variations d'émissions considérées à l'horizon 2050 sont bien plus importantes que celles observées dans la période récente (voir Figure 1). Les résultats sont donc à interpréter comme des projections sur la base des mécanismes connus et documentés, plutôt que comme des prévisions.

Par ailleurs, les simulations conduites ici supposent une certaine rigidité du système productif. Le nombre, l'orientation technico-économique des exploitations, leur répartition sur le territoire et la surface agricole dont ils disposent sont ainsi considérés comme fixes. De même, les leviers d'atténuation sont limités à la réallocation des surfaces (pas d'ajustement des doses d'azote par hectare), à des modifications de l'alimentation animale contraintes par les besoins des animaux et à la réduction des effectifs animaux (limitée à +/- 15 % de leur valeur de référence). Ces éléments sont de nature à surestimer le coût marginal auquel une réduction peut être atteinte ou, symétriquement, à sous-estimer l'atténuation qui peut être obtenue à un prix donné.

De plus, les simulations sont fondées sur une référence statique et donc négligent les développements futurs de la productivité (progrès technique sur les rendements végétaux et animaux, amélioration dans la sélection, effets du changement climatique, etc.). En outre, le modèle utilisé est centré sur une logique microéconomique où les agents sont preneurs de prix qui sont supposés exogènes. Les estimations n'intègrent donc pas les effets des variations induites de l'offre domestique sur l'offre agricole des autres pays, la demande (domestique et internationale), les échanges internationaux et *in fine* les prix d'équilibre. L'effet sur les coûts d'atténuation est ambigu, même si les résultats de Vermont et De Cara (2010) suggèrent que le coût marginal d'atténuation est en général plus faible lorsqu'il est estimé par des modèles d'équilibre qui prennent en compte ces effets. La démarche qui consiste à considérer plusieurs années de calibrage (et donc plusieurs des contextes de prix contrastés) permet (en partie) de quantifier la sensibilité des résultats à l'évolution des prix d'équilibre, mais elle ne résout pas l'ensemble des questions. En particulier, la démarche adoptée ici ne permet pas d'apprécier l'impact des variations de la demande alimentaire (que ce soit en réponse aux signaux des marchés ou à des évolutions structurelles dans les régimes alimentaires), ni de mesurer les éventuels effets de « fuite » (*leakage*) associés.

Enfin, le périmètre des émissions considérées joue un rôle important. On s'est concentré ici uniquement sur les émissions agricoles en négligeant les impacts potentiels sur les usages des sols (par exemple retournement de prairies) et les puits et sources de carbone qui peuvent y être associés.

## Conclusion

L'effort de modélisation dans le cadre des travaux de la commission Quinet a principalement porté sur la valeur du carbone permettant de remplir les objectifs d'émissions dans les secteurs très consommateurs d'énergie fossile (fourniture d'électricité, transports, résidentiel) en considérant la trajectoire des émissions agricoles comme donnée. Les résultats présentés dans ce texte complètent ces travaux et montrent que le secteur agricole peut jouer un rôle pivot dans l'atteinte de l'objectif français de neutralité carbone. Trois enseignements principaux peuvent en être tirés :

### ***Le coût marginal d'atténuation effectif pour un effort d'atténuation donné dépend fortement du contexte économique***

Les simulations mettent en évidence une sensibilité forte des coûts marginaux d'atténuation au contexte économique qui prévaut dans l'année de référence. Cette sensibilité reflète des contextes économiques très contrastés entre 2007 et 2012, période caractérisée par une forte variabilité des prix des produits et des intrants. Cet aspect était masqué dans les analyses antérieures qui avaient privilégié une référence statique

basée sur une seule année de référence. La convexité des courbes de coût marginal implique que l'intervalle de variation des prix auquel l'objectif d'émissions est satisfait est plus large que l'intervalle d'émissions pour une valeur donnée du carbone.

### ***La réallocation des activités au sein des exploitations agricoles peut fournir des potentiels d'atténuation significatifs***

À lui seul, le potentiel d'atténuation permis par la réallocation des activités au sein des exploitations agricoles (réallocation des surfaces, modifications dans l'alimentation animale et/ou la taille du cheptel) permet d'atteindre les objectifs d'émissions assignés au secteur agricole à un coût marginal d'environ 124 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2030 (de 92 à 175 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> selon l'année de calibrage) et de 335 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub> en 2050 (de 211 à 447 €<sub>2017</sub>/tCO<sub>2e</sub>).

### ***Pour atteindre les objectifs d'émissions assignés au secteur agricole français, il faudra vraisemblablement mobiliser également le potentiel technique d'atténuation***

Les travaux utilisés dans ce texte ont mis en évidence deux types de potentiels d'atténuation : (i) celui lié à la réallocation des activités au sein de chaque exploitation et (ii) celui lié à l'adoption de mesures techniques d'atténuation.

Ces deux types de potentiels devront être combinés pour atteindre efficacement les objectifs français d'atténuation.

Les résultats présentés dans ce texte suggèrent que, compte tenu de la valeur du carbone compatible avec les objectifs français dans les autres secteurs de l'économie, le secteur agricole serait en mesure d'aller au-delà des objectifs d'émissions qui lui ont été assignés. Les potentiels techniques et économiques d'atténuation dans ce secteur, s'ils sont mobilisés efficacement, pourraient ainsi peser à la baisse sur la trajectoire de la valeur du carbone pour l'ensemble de l'économie et permettre de contenir le coût total d'atteinte de l'objectif de neutralité carbone.

Pour quantifier les gains en efficacité que l'on peut attendre des réductions d'émissions dans le secteur agricole relativement, il faudrait recourir à des modélisations plus intégrées permettant de décrire la situation où les coûts marginaux d'atténuation sont égaux entre l'ensemble des secteurs émetteurs et des sources d'émissions.

Cette intégration peut se concevoir à plusieurs niveaux :

- Articulation des potentiels permis par la réallocation des activités au sein de chaque exploitation et ceux associés à l'adoption de nouvelles pratiques d'atténuation.

Intégrer de manière endogène les mesures techniques d'adaptation au sein du modèle microéconomique d'offre est possible mais nécessite des hypothèses pour tenir compte des différences méthodologiques entre les deux approches. Un travail dans ce sens est en cours dans le cadre d'une étude INRA sur les options de stockage de carbone dans les sols (« 4 pour mille »). Une telle articulation permettrait de qualifier l'additivité des deux types de potentiels examinés dans ce texte.

- Articulation de l'atténuation des émissions d'origine agricole et des sources/puits de carbone associés aux usages et à la gestion des sols.

Les réallocations de surfaces au sein des exploitations (et notamment les conversions de prairies en cultures ou vice-versa), ainsi que les conséquences des pratiques agricoles (labour, gestion des résidus, etc.) sur les stocks de carbone des sols n'ont pas été prises en compte dans le cadre des simulations présentées ici. Là encore, l'étude « 4 pour mille » en cours devrait fournir des éléments de réponse permettant de mieux intégrer ces aspects. Plus largement, les modifications des usages des sols (cultures, prairies, mais également forêts et urbanisation) sous l'effet des conditions de production (prix, mais également rendements sous l'effet du changement climatique) peuvent modifier sensiblement les émissions à la fois du secteur UTCF, mais aussi celles du secteur agricole. Leur prise en compte dans une approche plus intégrée requiert une représentation spatiale des usages des sols et de la dynamique des stocks de carbone. Des recherches sont en cours dans ce sens (Lungarska et Chakir, 2018).

- Articulation avec les potentiels et les coûts d'atténuation dans les autres secteurs de l'économie.

Dans une logique d'efficacité, il s'agit de faire émerger des trajectoires d'émissions qui permettent d'égaliser des coûts marginaux d'atténuation entre tous les secteurs de l'économie. Un couplage complet du modèle agricole et des modèles énergétiques n'a pas été possible dans le cadre des travaux de la Commission. Enfin, une difficulté supplémentaire dans ce dialogue tient à la cohérence entre l'utilisation de biomasse dans les modèles énergétiques et la disponibilité de l'offre de matières premières correspondantes.

## Références

Bamière L., Camuel A., De Cara S., Delame N., Dequiedt B., Lapierre A. et Lévêque B. (2017), *Analyse des freins et des mesures de déploiement des actions d'atténuation à coût négatif dans le secteur agricole : couplage de modélisation économique et d'enquêtes de terrain*, Rapport final pour l'Ademe, octobre, 79 p.

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*, 68(3), p. 471-490.

CITEPA (2017), *Inventaire des émissions de gaz à effet de serre en France au titre de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques*, CITEPA - ministère de l'Écologie et du Développement durable, Paris, France.

De Cara S., Henry L. et Jayet P.-A. (2018), « Optimal coverage of an emission tax in the presence of monitoring, reporting, and verification costs », *Journal of Environmental Economics and Management*, 89, p. 71-93.

De Cara S., Houzé M. et Jayet P.-A. (2005), « Methane and nitrous oxide emissions from agriculture in the EU: A spatial assessment of sources and abatement costs », *Environmental and Resource Economics*, 32(4), p. 551-583.

De Cara S. et Jayet P.-A. (2000), « Emissions of greenhouse gases from agriculture: The heterogeneity of abatement costs in France », *European Review of Agricultural Economics* 27(3), p. 281-303.

De Cara S. et Jayet P.-A. (2011), « Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions from European agriculture, cost-effectiveness, and the EU non-ETS Burden Sharing Agreement », *Ecological Economics*, 70(9), p. 1680-1690.

De Cara S. et Thomas A. (2008), *Projections d'émissions/absorptions de gaz à effet de serre dans les secteurs forêt et agriculture aux horizons 2010 et 2020*, Rapport final, ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Grignon, France, 192 p.

Forslund A., Colin A., De Cara S., Leban J.-M., Martin M., Mathias E., Guyomard H. et Stengel P. (2009), *Projections d'émissions et d'absorptions de gaz à effet de serre du secteur Utilisation des terres, leurs changements et la forêt (UTCF) à l'horizon 2020 en France*, Rapport final, INRA-IFN-CITEPA, Paris, France, 142 p.

Frank S., Beach R., Havlik P., Valin H., Herrero M., Mosnier A., Hasegawa T., Creason J., Ragnauth S. et Obersteiner M. (2018), « Structural change as a key component for agricultural non-CO<sub>2</sub> mitigation efforts », *Nature Communications*, 9(1), 1060.

High-Level Commission on Carbon Prices (2017), *Report of the High Level Commission on Carbon Prices*, Technical report, World Bank, Washington, DC, USA.

Isbaiou A., De Cara S. et Jayet P.-A. (2018), « Abatement of agricultural greenhouse gas emissions in the European Union: A revised analysis of marginal abatement costs », Presentation at the 164th EAAE seminar, Chania, Greece.

Lungarska A. et Chakir R. (2018), « Climate induced land use change in France: Impacts of agricultural adaptation and climate change mitigation », *Ecological Economics*, 147, p. 134-154.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.-P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.-H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I. et Pardon L. (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, Direction de l'expertise, de la prospective et des études (DEPE), Paris, France, 94 p.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoit M., Butault J.-P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.-H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L. et Chemineau P. (2017), « Identifying cost-competitive greenhouse gas mitigation potential of French agriculture », *Environmental Science & Policy*, 77, p. 130-139.

Vermont B. et De Cara S. (2010), « How costly is mitigation of non-CO<sub>2</sub> greenhouse gas emissions from agriculture? A meta-analysis », *Ecological Economics* 69(7), p. 1373-1386.

Wollenberg E., Richards M., Smith P., Havlik P., Obersteiner M., Tubiello F. N., Herold M., Gerber P., Carter S. et Reisinger A. (2016), « Reducing emissions from agriculture to meet the 2 °C target », *Global Change Biology*, 22(12), p 3859-3864.



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](mailto:jean-michel.roulle@strategie.gouv.fr)**

RETROUVEZ  
LES DERNIÈRES ACTUALITÉS  
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



[www.strategie.gouv.fr](http://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**



Premier ministre

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.