



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PREMIER MINISTRE



Centre
d'analyse
stratégique

Juin 2008

La valeur tutélaire du carbone

Rapport de la commission
présidée par Alain QUINET

Rapports et documents

La valeur tutélaire du carbone

Alain Quinet, président de la commission

Luc Baumstark, rapporteur général

Joffrey Célestin-Urbain, rapporteur
Hervé Pouliquen, rapporteur

Dominique Auverlot, coordinateur
Christine Raynard, coordinatrice



Table des matières

Introduction et principales conclusions	7
1. L'évolution du contexte international depuis 2001 conduit aujourd'hui à réévaluer la valeur du carbone recommandée par le rapport Boiteux	7
2. La commission mise en place par le Centre d'analyse stratégique s'est appuyée sur les engagements européens et sur un usage raisonné des modèles économiques pour proposer une nouvelle valeur tutélaire du carbone.....	9
3. Les travaux de la commission débouchent sur une valeur réelle du carbone croissant continûment dans le temps à l'horizon 2050.....	10
4. La mise en place d'une valeur carbone s'inscrit dans une démarche générale de prévention du risque climatique en situation d'incertitude.....	12
5. La commission a jugé utile de formuler quelques recommandations sur le bon usage de la valeur du carbone.....	13
Chapitre 1 Les enjeux d'une réflexion sur la valeur du carbone	15
1. Le mandat confié à la commission.....	15
1.1. Le contexte de la saisine du Centre d'analyse stratégique.....	15
1.2. Une longue tradition du calcul économique en France.....	15
2. Les usages possibles d'une valeur tutélaire du carbone	17
2.1. Un référentiel pour valoriser l'effet de serre dans l'évaluation de la rentabilité des projets d'investissements publics	17
2.2. Un instrument pour définir et évaluer l'efficacité des grandes politiques publiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre	18
2.3. Une référence pour le calibrage des instruments de régulation économique.....	19
2.4. Un signal pour les choix de R & D et d'investissement des entreprises	19
3. Les travaux de la commission.....	20
3.1. L'organisation de la commission et de ses travaux	20
3.2. La logique de construction du rapport.....	21
Chapitre 2 Le nouveau contexte international de la lutte contre le changement climatique	23
1. L'avancée des travaux scientifiques autour de l'effet de serre et du changement climatique	23
1.1. Un objet scientifique mieux balisé : le rôle essentiel des travaux du GIEC.....	23
1.2. Les enjeux économiques du dérèglement climatique	27
2. Le traitement international de l'effet de serre et les incertitudes à venir.....	29
2.1. La dynamique créée par le protocole de Kyoto	29
2.2. Les incertitudes sur la suite des engagements internationaux	31
2.3. Les objectifs de la France et de l'Union européenne.....	32
3. Le changement de tendance dans l'évolution des prix de l'énergie.....	33
3.1. L'envolée des prix du pétrole.....	34
3.2. Le renchérissement du charbon	35
4. L'émergence des marchés du carbone	36
4.1. La mise en place d'un marché européen de quotas de CO ₂	36
4.2. Prix de marché et valeur tutélaire du carbone	39
Chapitre 3 Les différentes approches de la valeur du carbone	41
1. Les références pour définir la valeur du carbone.....	41
1.1. Le coût social des dommages et l'analyse coûts/avantages.....	41
1.2. Le coût d'abattement des émissions de CO ₂	43

2.	Les exercices institutionnels de détermination d'une valeur tutélaire du carbone	46
2.1.	Le précédent exercice de la commission Boiteux	46
2.2.	Les valeurs du GIEC	46
2.3.	Le référentiel proposé par l'administration britannique.....	47
2.4.	L'exercice de simulation de l'administration américaine.....	48
2.5.	Les travaux entrepris par la Commission européenne.....	49
2.6.	Synthèse	51
3.	Positionnement à l'égard de la démarche du rapport Stern	51
3.1.	Une approche économique pour éclairer la décision publique.....	52
3.2.	L'approche coûts/efficacité et l'approche coûts/avantages	54
3.3.	La question du taux d'actualisation	57

Chapitre 4 Les enseignements de l'analyse économique de l'environnement ... 59

1.	Une valeur unique du carbone, qui peut se décliner de manière différenciée au niveau des instruments de politique économique	59
1.1.	Les enjeux d'un référentiel unique	59
1.2.	Une différenciation possible au niveau des instruments économiques	61
2.	La trajectoire optimale de la valeur carbone	62
2.1.	Un modèle simplifié de contrôle optimal pour appréhender la gestion des ressources épuisables : la règle de Hotelling	62
2.2.	L'adaptation de la règle de Hotelling à l'effet de serre.....	63
3.	Les amendements à apporter à la règle de Hotelling	68
3.1.	Les mécanismes d'absorption naturelle du CO ₂	68
3.2.	La prise en compte de l'incertitude.....	68
3.3.	Les enseignements à tirer pour l'élaboration du référentiel carbone	72

Chapitre 5 Les scénarios de modélisation 75

1.	Le rôle de la modélisation	75
1.1.	Les modèles technico-économiques	76
1.2.	Les modèles macroéconomiques	76
2.	Les exercices de simulation	77
2.1.	Les simulations d'un modèle théorique simplifié	77
2.2.	L'exercice de modélisation	80
2.3.	Les trois scénarios polaires étudiés.....	80
2.4.	La construction du scénario de référence.....	82
2.5.	Les principaux résultats des simulations	83

Chapitre 6 La trajectoire de valeurs du carbone 89

1.	Une concentration de 450 ppme au centre des objectifs considérés	89
2.	Les recommandations	90
2.1.	Une valeur en 2030 autour de 100 euros la tonne de CO ₂	90
2.2.	Une règle de Hotelling calée sur 4 % à partir de 2030	90
2.3.	Une valeur initiale 2010 à 32 euros la tonne de CO ₂	91
3.	La sensibilité de la valeur du carbone au prix des énergies fossiles	92
3.1.	Le référentiel et le contexte des prix énergétiques	92
3.2.	Prix des énergies et valeur du carbone : les signaux des marchés et les simulations des modèles	94

Conclusion générale..... 97

TABLES 99

Bibliographie..... 101

MEMBRES DE LA COMMISSION 107

Introduction et principales conclusions

Le « Grenelle de l'environnement » a réaffirmé l'engagement français dans la lutte contre le changement climatique et proposé à cet effet un nouveau programme d'investissements, d'incitations financières et fiscales et de transformations institutionnelles. Le président de la République, dans son discours de clôture, a notamment annoncé que « tous les projets publics, toutes les décisions publiques seront désormais arbitrés en intégrant leur coût pour le climat, leur coût en carbone ».

La valorisation monétaire des émissions de CO₂ actuellement retenue pour évaluer la rentabilité des investissements publics résulte des travaux de la commission « Transports : choix des investissements et coût des nuisances » présidée par Marcel Boiteux. Cette commission avait recommandé en 2001 de retenir une valeur de référence du CO₂ de 27 euros la tonne (correspondant à une valeur du carbone de 100 euros la tonne¹). Cette valeur, exprimée en euros 2000, sert aujourd'hui essentiellement à l'évaluation des choix d'infrastructures de transports, dans le cadre de l'instruction des 25 mars 2004 et 27 mai 2005 du ministère en charge de l'Équipement.

Début 2008, le Premier ministre, sur proposition du ministre d'État, ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire (MEEDDAT), a demandé au secrétaire d'État chargé de la Prospective, de l'Évaluation des Politiques publiques et du Développement de l'Économie numérique de proposer une nouvelle valeur du carbone pour l'évaluation des choix d'investissements publics et, plus généralement, pour l'évaluation environnementale des politiques publiques.

Pour répondre à cette demande, le Centre d'analyse stratégique a réuni une commission composée de représentants des partenaires économiques et sociaux et des organisations environnementales, d'économistes de l'université et du CNRS, de l'AIE et de l'OCDE, de la Caisse des dépôts, de l'ADEME, ainsi que de représentants du MEEDDAT et du ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi. La valeur du carbone recommandée dans le présent rapport est le fruit d'un compromis entre ces différents participants².

1. L'évolution du contexte international depuis 2001 conduit aujourd'hui à réévaluer la valeur du carbone recommandée par le rapport Boiteux

Premier élément : le cadre scientifique et politique s'est précisé

Depuis 2001, les travaux scientifiques portant sur le changement climatique ont permis de progresser dans la compréhension des liens entre activités humaines, émissions de gaz à effet de serre et probabilités d'augmentation des températures et des perturbations climatiques. Les publications du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat), notamment, ont

(1) On passe de la valeur du carbone à la valeur de la tonne de CO₂ en appliquant un coefficient de 3/11.

(2) Les principales contributions des participants ayant alimenté la réflexion collective sont rassemblées dans un second tome.

largement contribué à affiner et à diffuser l'expertise scientifique et socioéconomique sur le climat.

Dans le même temps, le cadre politique s'est précisé, avec la mise en place d'engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre, dont certains constituent des engagements internationaux fermes :

- entré en vigueur en 2005, le protocole de Kyoto engage juridiquement les principaux pays qui l'ont ratifié à réduire leurs émissions annuelles de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 par rapport à 1990, tout en prévoyant un mécanisme d'échange de permis d'émissions et des mécanismes de flexibilité sur la base de projets ;
- l'Europe s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020 de 20 % de manière unilatérale ou de 30 % « *pour autant que d'autres pays développés s'engagent à atteindre des réductions d'émissions comparables et que les pays en développement plus avancés sur le plan économique apportent une contribution adaptée à leurs besoins et à leurs capacités respectives* », selon les conclusions du Conseil européen de mars 2007 ;
- en France, la loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE du 13 juillet 2005) « *soutient la définition d'un objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050, ce qui nécessite, compte tenu des différences de consommation entre pays, une division par quatre ou cinq de ces émissions pour les pays développés* ». Le « Grenelle de l'Environnement » a confirmé cet engagement de la France et proposé à cet effet un ensemble de mesures et de nouveaux investissements publics.

Deuxième élément : la mise en place de marchés de permis d'émissions de CO₂ permet de faire émerger un prix du carbone

Afin d'anticiper les échanges de permis d'émissions entre États prévus par le protocole de Kyoto, l'Europe a choisi de mettre en œuvre, à partir du 1^{er} janvier 2005, un système européen d'échange de quotas (ETS) qui couvre environ 45 % des émissions de CO₂ en provenance principalement des secteurs de l'énergie et des industries grosses consommatrices d'énergie. Il ne concerne pas, en revanche, l'agriculture, l'habitat et les transports.

Ce marché a conduit à faire émerger un prix du CO₂ de 20 à 25 euros la tonne sur la période récente, soit un niveau un peu inférieur à la valeur fixée par le rapport Boiteux.

Le marché des permis fournit une information nouvelle qu'il convient de prendre en compte. Cependant, l'horizon et le champ couverts par ces marchés restent limités, et leur fonctionnement imparfait, si bien qu'ils ne peuvent constituer la seule référence pour les calculs de long terme. C'est pourquoi ce rapport continue de retenir une approche dite tutélaire, dans la mesure où la valeur monétaire recommandée ne découle pas directement de l'observation des prix de marché mais relève d'une décision de l'État, sur la base d'une évaluation concertée de l'engagement français et européen dans la lutte contre le changement climatique.

Troisième élément : la modélisation économique du développement durable a progressé

Les progrès de la modélisation économique (des modèles eux-mêmes et des bases de données qui les alimentent) permettent aujourd'hui de mieux représenter l'évolution des économies sous une « contrainte carbone », en prenant en compte des possibilités de changements technologiques propres à chaque secteur et les interactions entre valeur du carbone, prix des énergies fossiles et équilibre économique global.

Parallèlement, les débats sur le taux d'actualisation public ont trouvé avec le développement durable une nouvelle actualité, en incitant les économistes à expliciter le traitement de l'incertitude et les fondements éthiques du poids relatif à accorder aux générations présentes et futures. En France, le rapport Lebègue, publié en 2005, a conduit à diviser par deux (de 8 % à 4 %) le taux d'actualisation à retenir pour évaluer la rentabilité des choix d'investissements publics. Ces débats sur l'actualisation ont aussi eu le mérite de souligner l'enjeu d'une bonne valorisation des biens environnementaux.

2. La commission mise en place par le Centre d'analyse stratégique s'est appuyée sur les engagements européens et sur un usage raisonné des modèles économiques pour proposer une nouvelle valeur tutélaire du carbone

La commission s'est attachée à définir une trajectoire du carbone compatible avec le respect des objectifs européens à l'horizon 2020-2050

L'Europe a adhéré à l'objectif de limiter le réchauffement moyen à 2° C par rapport à la situation préindustrielle. Conformément aux indications du dernier rapport du GIEC, l'objectif global d'émission correspondant consisterait à viser un plafond de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère de 450 ppme (parties par million équivalent CO₂), nécessitant une division par deux des émissions mondiales à l'horizon 2050.

Les engagements européens sont de deux natures : un engagement ferme de réduire de 20 % ses propres émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2020 ; un objectif de réduction de 60 % à 80 % des émissions d'ici à 2050. C'est donc clairement sur la base de cet objectif ambitieux, conforme aux engagements politiques de la France, que la commission a défini le référentiel carbone à l'horizon 2050. La présente commission a postulé que l'Europe s'engageait de manière unilatérale jusqu'en 2020, tout en œuvrant à la conclusion d'un accord international. Elle serait rejointe à cet horizon dans son objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre par l'ensemble des pays développés ainsi que par les pays émergents et pourrait ainsi s'appuyer sur la formation d'un marché mondial du carbone pour atteindre cet objectif. La trajectoire de la valeur du carbone proposée dans ce rapport entend rendre compte de cette transition à venir, entre un schéma d'action unilatérale de l'Europe et l'avènement d'un monde intégré du point de vue des objectifs et des politiques climatiques¹.

Le présent rapport adopte une approche pragmatique de type coûts/efficacité

L'approche retenue ici est une approche de type coûts/efficacité : elle consiste à déterminer la trajectoire de valeurs du carbone qui permette d'atteindre les objectifs politiques européens de mars 2007.

L'approche de type coûts/efficacité diffère de celle retenue par le rapport de Nicholas Stern et autres rapports de type coûts/avantages. Ces derniers tentent de fixer de façon optimale la contrainte d'émissions au niveau mondial, en égalisant à tout instant le coût marginal d'abattement d'une tonne de CO₂ et la somme actualisée des dommages marginaux futurs

(1) Si l'Europe était effectivement rejointe par les autres pays développés et par les pays émergents dans la mise en œuvre de l'objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre avant 2020, elle se fixerait alors un objectif plus sévère (- 30% en 2020), tout en ayant la possibilité de limiter la hausse induite du coût du programme de réduction par le recours à des quotas, obtenus sur le futur marché mondial du carbone.

d'une tonne de CO₂ émise aujourd'hui. Dans la mesure où les dommages sont susceptibles de se matérialiser sur un horizon très long, le choix du taux d'actualisation revêt alors une importance cruciale dans cet exercice.

Les deux approches sont complémentaires et doivent « dialoguer » entre elles. Les objectifs d'abattement des émissions pourront toujours être ajustés en fonction des observations et des progrès scientifiques futurs. L'approche retenue reste donc compatible avec une approche coûts/avantages à très long terme, pouvant permettre de réévaluer régulièrement les objectifs optimaux au niveau mondial.

3. Les travaux de la commission débouchent sur une valeur réelle du carbone croissant continûment dans le temps à l'horizon 2050

La valeur du carbone recommandée dans ce rapport s'appuie sur un usage raisonné de la théorie économique et des modèles sollicités

Les trois modèles spécifiquement « mobilisés » par cette commission – GEMINI-E3, POLES et IMACLIM-R – fournissent des ordres de grandeur de la valeur du carbone requise pour respecter les objectifs d'émission. S'ajoute à ces trois modèles de simulation un modèle de contrôle optimal des ressources rares employé pour calculer le sentier optimal d'émissions d'un « budget » limité de carbone.

Compte tenu des incertitudes et des degrés de liberté qui subsistent dans les préconisations des économistes, la valeur du carbone finalement recommandée est le fruit d'un compromis réalisé au sein d'une commission composée d'économistes et de représentants des partenaires économiques, sociaux et environnementaux.

La trajectoire de valeur carbone recommandée par la commission repose sur trois éléments

La valeur du CO₂ est fixée à 100 euros la tonne à l'horizon 2030. Cette valeur sert d'ancrage dans le reste de l'analyse. Son niveau relativement élevé reflète essentiellement le caractère ambitieux des objectifs européens de réduction des gaz à effet de serre et la difficulté de réussir le déploiement des technologies peu émettrices sur un horizon aussi court.

Après 2030, la commission recommande de faire croître cette valeur de 100 euros au rythme du taux d'actualisation public de 4 %, soit le taux d'actualisation public proposé par le rapport Lebègue de 2005. Cette règle d'évolution au cours du temps, similaire à la règle de Hotelling pour l'exploitation optimale des ressources épuisables, est une règle de préservation de l'avenir. Elle garantit que le prix actualisé d'une ressource limitée reste constant au cours du temps et n'est pas « écrasé » par l'actualisation. Avec ces hypothèses, la valeur du carbone retenue croît de 100 euros la tonne de CO₂ en 2030 à 200 euros la tonne de CO₂ en 2050.

De 2010 à 2030, la commission a discuté deux scénarios :

- le premier scénario consisterait à appliquer « mécaniquement » la règle de Hotelling, avec un taux d'actualisation de 4 % par an. Cela supposerait, pour atteindre 100 euros en 2030, de partir d'une valeur du carbone de 45 euros en 2010. Un tel « saut » permettrait d'intégrer un effet de précaution, compte tenu des incertitudes sur le progrès technique et du fait que le coût des dommages est aussi fonction de la trajectoire retenue. Il poserait cependant deux types de problèmes : le premier de cohérence dans le temps de l'action publique (qui jusqu'à aujourd'hui a affiché une valeur du CO₂ de 27 euros la tonne) et le

second de transition en concentrant sur une seule année, 2010 en l'occurrence, le changement de référentiel ;

- le second scénario consiste à partir de la valeur Boiteux pour rejoindre la valeur pivot de 100 euros en 2030. Ce scénario s'écarte de la règle de Hotelling en début de période pour privilégier un rattrapage progressif vers la valeur de 100 euros en 2030. Ce second scénario repose sur l'idée que la transition vers une valeur du carbone élevée doit être progressive pour deux raisons : exploiter en priorité les gisements d'abattement à faibles coûts aujourd'hui disponibles ; ne pas peser sur la croissance et faciliter la gestion des transitions économiques, sociales et professionnelles.

C'est ce second scénario qui a été retenu par la commission.

Tableau n° 1 : Valeur tutélaire d'une tonne de CO₂
(en euros 2008)¹

	2010	2020	2030	2050
Valeur recommandée	32	56	100	200 (150-350)
Valeur actuelle (Valeur « Boiteux »)	32 ⁽¹⁾	43	58	104

Source : Centre d'analyse stratégique

La commission considère qu'il faut éviter d'établir un lien mécanique entre la valeur tutélaire du carbone et le prix du pétrole

Dans la logique coûts/efficacité retenue ici, il existe une substituabilité de principe entre la valeur du carbone et le prix agrégé des énergies fossiles pour atteindre un objectif donné de réduction des émissions.

- cependant, dans un tel raisonnement, la valeur de la tonne carbone devrait dépendre non seulement du prix du pétrole, mais aussi du prix du gaz et du charbon : une valeur élevée du pétrole et du gaz peut en effet inciter, comme c'est le cas aujourd'hui pour le secteur électrique, et comme cela pourrait l'être dans le futur pour la production de carburants liquides, à se tourner vers la production de charbon, dont les réserves sont abondantes et moins chères. Or les émissions de CO₂ induites par la consommation d'une unité de charbon sont supérieures à celles d'une unité de pétrole² ;
- par ailleurs, un prix élevé du pétrole peut signaler une augmentation de la demande de pétrole, par exemple en raison d'une croissance mondiale plus vigoureuse que celle sous-jacente à la valeur recommandée ici, ce qui appellerait une révision à la hausse de la valeur tutélaire du carbone pour contenir la pression à la hausse sur les émissions.

Pour ces raisons, la commission ne propose pas de faire dépendre la valeur tutélaire du carbone de la valeur du pétrole. Elle considère que les valeurs du carbone proposées restent valables pour un prix du pétrole compris entre 50 et 100 euros le baril et pour un prix du charbon compris entre 60 et 120 euros la tonne. Une révision pourrait devenir nécessaire si la tendance de prix des énergies fossiles s'écartait durablement de cette fourchette.

(1) Le rapport Boiteux donnait une valeur de la tonne de CO₂ de 27 € en 2000, correspondant, après prise en compte de l'inflation, à une valeur de 32 € en euros 2008.

(2) Une TEP (tonne équivalent pétrole) de charbon émet 4 tonnes de CO₂, tandis qu'une TEP de pétrole en émet 3,1 et une TEP de gaz 2,3. Voir sur ce point *Les chiffres clefs : CO₂ et énergie - France et monde*, édition 2007, Observatoire de l'énergie et Caisse des dépôts.

4. La mise en place d'une valeur carbone s'inscrit dans une démarche générale de prévention du risque climatique en situation d'incertitude

Les valeurs du carbone recommandées ici restent naturellement entourées de nombreuses incertitudes, d'autant plus grandes que l'horizon s'éloigne

C'est pourquoi la commission a souhaité encadrer la valeur 2050 de 200 euros d'une fourchette allant de 150 à 350 euros. Cette fourchette vise à illustrer l'ampleur des incertitudes qui entourent la détermination de la bonne valeur du carbone au-delà de 2030, tant sur le plan des accords internationaux que sur le plan des technologies disponibles – qu'il s'agisse des systèmes de production d'énergie non carbonée ou des techniques de capture et de stockage du carbone.

Ces incertitudes ne doivent pas être vues comme affaiblissant la démarche et les recommandations de ce rapport :

- l'incertitude est inhérente à toute politique de lutte contre le changement climatique ;
- l'incertitude sur les chiffrages ne doit pas occulter le fait que ceux-ci ont été réalisés précisément pour réduire l'incertitude et donner de la lisibilité aux acteurs économiques et sociaux sur les engagements pris par l'Europe et la France.

L'incertitude se réduira au fil des années en fonction des informations nouvelles, bonnes ou mauvaises, non disponibles à ce jour. La trajectoire de valeurs du carbone proposée devra donc faire l'objet de réévaluations à intervalles réguliers.

Ces exercices de réévaluations devraient intervenir au moins tous les cinq ans. Ils seraient l'occasion de faire le point sur la mise en œuvre du référentiel proposé et permettraient d'intégrer :

- les informations nouvelles sur le coût anticipé des dommages, sur le coût des efforts d'abattement révélés par les marchés de permis ou sur les prix des énergies fossiles ;
- les conséquences d'un éventuel écart entre les émissions de gaz à effet de serre observées et la trajectoire cible visée ;
- le résultat des négociations internationales, par exemple la conférence des parties prévue fin 2009 à Copenhague, si elle aboutit à un nouvel accord international ;
- les travaux de même nature sur la valeur tutélaire du carbone qui pourraient être engagés au niveau européen et qui appelleraient un effort de convergence entre pays. Il convient de rappeler en effet qu'il n'existe pas encore de valeur tutélaire européenne.

Comme l'a bien montré le rapport Stern, l'incertitude ne doit pas conduire à l'inaction. Une stratégie de prévention du risque climatique doit au contraire s'attacher :

- à utiliser au mieux toute l'information disponible ;
- à minimiser les irréversibilités. Il faut agir de manière suffisamment rapide pour favoriser la production et la diffusion de nouvelles solutions techniques et éviter la survenance de dommages irréversibles, sans pour autant prendre le risque de « bloquer » la croissance en imposant à l'économie des contraintes trop strictes ;
- à suivre un processus de décision séquentiel, en adoptant à titre de précaution des objectifs initiaux ambitieux. Cette stratégie a pour avantage essentiel de réduire le choc d'une mauvaise nouvelle à l'avenir et d'aborder le risque de révision des objectifs dans une situation plus favorable.

Cette triple exigence est au cœur de ce rapport, qui s'appuie sur l'information disponible et sur des objectifs européens ambitieux pour recommander une trajectoire du carbone utile à l'élaboration des choix publics et à la formation des anticipations des agents économiques.

5. La commission a jugé utile de formuler quelques recommandations sur le bon usage de la valeur du carbone

La commission a établi une valeur du carbone dont elle recommande l'utilisation dans la définition des politiques publiques et le calcul économique. Cette valeur doit ensuite être adaptée aux usages particuliers que l'on voudrait en faire, en tenant compte des impacts économiques et financiers, de la gestion des transitions professionnelles qu'impliquent les mutations sectorielles, ainsi que des effets redistributifs.

La recommandation de valeur carbone formulée par la commission s'inscrit d'abord dans le cadre général d'une mise à jour du référentiel de calcul économique utilisé pour les choix d'investissements publics.

En intégrant la valeur du carbone proposée ici dans l'ensemble des calculs sur les différents projets qu'elle envisage, la puissance publique se donne les moyens d'éclairer les discussions sur l'intérêt de ces investissements, sur les arbitrages qu'il est nécessaire d'établir entre les projets envisagés et de faire en sorte que ces choix restent cohérents du point de vue de la lutte contre l'effet de serre.

Même si la valeur du carbone initiale est proche de celle recommandée dans le rapport Boiteux de 2001, le taux de croissance de la valeur du CO₂ (4 %, soit le taux d'actualisation public) améliore significativement la prise en compte de l'effet de serre dans les évaluations socioéconomiques. Si on considère par exemple un projet qui permet d'économiser chaque année jusqu'en 2050 dix tonnes de CO₂, le bénéfice retiré du CO₂ évité est significativement plus élevé qu'avec les valeurs Boiteux.

Tableau n° 2 : Valeur actualisée d'une économie de 10 tonnes de CO₂ par an sur la période 2010-2050

Valeur Boiteux (1)	Valeur recommandée
10 900 €	17 000 €

(1) 32€ la tonne, croissant à 3 % par an, actualisée à 4 %.

Source : Centre d'analyse stratégique

Il convient de souligner que la croissance de la valeur du carbone à 4 % l'an tend à accroître son importance par rapport aux autres éléments du calcul de rentabilité (gains de temps, de sécurité, etc.). En effet, cette valeur, contrairement aux autres, n'est pas « écrasée » par l'actualisation au fur et à mesure que l'horizon s'allonge.

La valeur du carbone retenue constitue plus généralement un élément de référence pour évaluer la pertinence environnementale des politiques publiques de réglementation, de subventions ou de dépenses fiscales.

Si le coût de la tonne de carbone évitée par une norme ou une subvention est significativement éloigné de la référence proposée, cela signifie que le coût économique peut être *a priori* considéré comme excessif au regard de l'objectif de lutte contre le changement climatique.

Au cas par cas, certaines considérations peuvent ensuite justifier que l'on engage des actions dont le coût de la tonne de CO₂ évitée soit supérieur au référentiel proposé : il peut par exemple être pertinent de subventionner la recherche et développement « verte », en raison de la nature de bien public de cette activité et de ses effets d'entraînement favorables, ou encore d'accompagner le développement de filières nouvelles.

Ce référentiel peut également être utile pour aider au calibrage des instruments économiques de lutte contre le changement climatique.

Ce référentiel donne une indication du signal-prix dont l'économie a besoin pour satisfaire les objectifs d'émissions. Il n'a pas cependant vocation en tant que tel à fixer mécaniquement le niveau de la fiscalité environnementale, pour plusieurs raisons :

- la valeur du carbone peut être internalisée au travers d'une grande variété d'instruments économiques : fiscalité mais aussi marchés de permis, normes et réglementations imposées aux logements ou aux véhicules, péages, certificats verts, *bonus-malus*, subventions à la R & D « verte » ;
- la valeur du carbone peut être internalisée de manière différenciée entre les secteurs économiques, pour tenir compte de considérations de compétitivité ou d'inertie des équipements ;
- la montée en puissance des instruments économiques de lutte contre le changement climatique doit tenir compte de leur incidence économique et sociale et de leurs effets redistributifs. Il convient sur ce point de rappeler que cette incidence dépend fortement des modalités de recyclage des recettes dégagées et des éléments de réforme fiscale qui en découlent ;
- il faut tenir compte du caractère plus ou moins concurrentiel des marchés, voire des mouvements spéculatifs qui peuvent s'y manifester. Les pays consommateurs de pétrole doivent en particulier gérer un conflit de partage de rentes avec les pays producteurs. La structure et le fonctionnement du marché du pétrole sont en effet très loin d'une situation de concurrence parfaite, si bien que les prix sur le marché mondial ne reflètent pas seulement les coûts de production ou la rente de ressources naturelles, mais aussi une stratégie d'offre des producteurs. Dans un tel contexte, la fiscalité sur le pétrole constitue le moyen pour les pays consommateurs de récupérer une partie de la rente pétrolière. Réciproquement, on ne peut exclure que les prix du pétrole incorporent une anticipation du plafonnement des émissions de CO₂ et le souhait des producteurs de « capter » à la source une partie de la valeur du carbone.

Enfin, et peut-être surtout, la trajectoire de carbone recommandée par cette commission peut constituer un signal de moyen terme adressé à l'ensemble des acteurs publics et privés sur le prix du carbone auquel ils pourront être confrontés au cours des prochaines décennies.

À ce titre, le référentiel carbone a vocation à jouer un rôle important dans la définition des stratégies nationales d'urbanisme, d'aménagement du territoire, de transport et d'énergie. Même si la définition de ces stratégies ne s'appuie pas sur un calcul économique formalisé, la valeur du carbone constitue un critère déterminant de leur évaluation à long terme.

Le signal d'un renchérissement du carbone a également vocation à stimuler les investissements publics et privés dans la recherche et développement, et dans les technologies plus sobres en carbone.

Chapitre 1

Les enjeux d'une réflexion sur la valeur du carbone

1. Le mandat confié à la commission

1.1. Le contexte de la saisine du Centre d'analyse stratégique

Début 2008, le Premier ministre, sur proposition du ministre d'État, ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, a demandé au secrétaire d'État en charge de la Prospective, de l'Évaluation des Politiques publiques et du Développement de l'Économie numérique de proposer une nouvelle valeur du carbone pour l'évaluation des choix d'investissements publics et, plus généralement, pour l'évaluation environnementale des politiques publiques (voir la lettre de saisine du Premier ministre en fin de ce volume).

Cette nouvelle valeur du carbone a notamment vocation à se substituer à celle aujourd'hui préconisée dans l'instruction des 25 mars 2004 et 27 mai 2005 qui encadre les évaluations socioéconomiques des grands investissements de transport, même si son objet est plus large.

La lettre de saisine du Premier ministre s'inscrit dans la dynamique créée par le « Grenelle de l'environnement », qui constitue un tournant collectif dans la prise en compte par la société française des enjeux environnementaux, particulièrement ceux liés à l'effet de serre. Dans son discours prononcé à l'occasion de la restitution des conclusions du « Grenelle », le président de la République a notamment annoncé trois initiatives qui appellent une mise à jour du calcul économique :

- une évaluation de tous les grands projets publics et de toutes les décisions publiques à l'aune de leur coût pour le climat ;
- un grand programme d'investissements publics destinés à la lutte contre le changement climatique ;
- de nouvelles incitations financières et fiscales pour rendre les comportements plus respectueux de l'environnement.

1.2. Une longue tradition du calcul économique en France

Le travail de détermination de la valeur du carbone s'inscrit dans une longue tradition française de calcul économique public. Celui-ci a pour objet d'évaluer la rentabilité socioéconomique des investissements publics pour la collectivité. Pour pouvoir effectuer une telle évaluation, il faut prendre en compte les coûts financiers de construction et d'exploitation, mais aussi les avantages et les coûts non monétaires induits par ces investissements : gains de temps, de sécurité, pollutions émises ou évitées. On qualifie de « prix fictifs » la valeur monétaire donnée à ces avantages et coûts.

La prise en compte de l'environnement et de la lutte contre le changement climatique s'inscrit pleinement dans cette problématique : pour évaluer la pertinence d'un investissement public, il convient d'évaluer son impact sur la biodiversité, les pollutions locales et les émissions de gaz

à effet de serre. Ne pas le faire, au motif que les valeurs que l'on peut attribuer à ces effets sont incertaines et contestables, reviendrait à négliger ces impacts au moment de la sélection des projets.

Les valeurs données au temps gagné ou perdu, au CO₂ émis ou évité sont dites tutélaires¹, soit parce qu'elles ne sont pas fournies directement par un marché, soit parce que les valeurs de marché ne reflètent qu'imparfaitement la réalité des coûts sociaux. Les valeurs tutélaires sont fixées par l'État. Elles ne sont pas arbitraires : elles sont fixées en fonction des attentes de la société telles qu'on peut les appréhender ; elles résultent d'un compromis qui a été élaboré au Commissariat général du Plan (CGP) puis au Centre d'analyse stratégique sur la base d'un dialogue entre économistes, partenaires économiques et sociaux, et représentants des organisations non gouvernementales.

L'exercice de réévaluation de la valeur carbone engagé ici s'inscrit dans la perspective proposée par le rapport de Christian de Boissieu autour du « facteur 4 », et s'appuie sur trois exercices d'évaluation et de prospective engagés par le CGP puis par le Centre d'analyse stratégique² :

- le premier est celui de la valorisation économique du carbone engagée par les deux commissions présidées par Marcel Boiteux³ (1994 et 2001). Ces travaux ont débouché sur une première valorisation monétaire du carbone, fixée en 2001 à 27 euros la tonne de CO₂ ;
- le deuxième exercice est celui du rapport Lebègue⁴ qui a révisé en 2005 le taux d'actualisation public en le ramenant de 8 % à 4 %. Selon ce rapport, la baisse du taux d'actualisation permet une meilleure prise en compte de l'avenir dans les décisions publiques ; elle doit s'accompagner d'une réévaluation du prix relatif des biens publics environnementaux dans les choix publics et sur les marchés ;
- le troisième exercice est le travail de prospective énergétique mené sous la présidence de Jean Syrota⁵. Ce rapport souligne la nécessité pour l'État de définir une valeur tutélaire unique de la tonne de CO₂ émise ou évitée. Il estime que les valeurs du carbone actuellement préconisées au plan national ou au plan international sont trop faibles pour permettre le développement des technologies nécessaires au développement durable.

(1) Baumstark L., « La mesure de l'utilité sociale des investissements : l'enjeu du processus de production des valeurs tutélaires » in J. Maurice et Y. Crozet (dir.). *Les dimensions critiques de calcul économique*, Paris, Economica, 2007.

(2) de Boissieu C., *Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050*, Rapport pour le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie et le ministère de l'Écologie et du Développement durable, août 2006. Ce rapport propose une stratégie et des recommandations pour atteindre une division par 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050.

(3) Commissariat Général du Plan, *Transports : pour un meilleur choix des investissements*, Rapport du groupe de travail présidé par Marcel Boiteux, Paris, La Documentation française, 1994. Commissariat général du Plan, *Transports : choix des investissements et coût des nuisances (2001)*, Rapport du groupe présidé par Marcel Boiteux, Rapporteur général : Luc Baumstark, Paris, La Documentation française, juin 2001.

(4) Commissariat général du Plan, *Le prix du temps et la décision publique*, Rapport du groupe présidé par Daniel Lebègue, Rapporteur général Luc Baumstark, Coordinateur Philippe Hirtzmann, Paris, La Documentation française, 2005.

(5) Centre d'analyse stratégique, *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, Rapport de la commission Énergie présidée par Jean Syrota, Paris, La Documentation française, mars 2008, 2 tomes. Voir les pages 101-102 (volume 1) dans lesquelles le rapport évoque l'intérêt d'une valeur normative du carbone ou encore d'une chronique normative du carbone.

2. Les usages possibles d'une valeur tutélaire du carbone

Une valeur tutélaire du carbone constitue fondamentalement un instrument de mesure permettant d'introduire dans les débats et les décisions un minimum de cohérence, tant au plan international que national. La théorie économique donne quelques principes normatifs assez simples qu'il est utile de rappeler :

- Il est raisonnable de poursuivre l'effort de réduction des émissions tant que l'avantage que la société en retire reste supérieur aux coûts qu'il faut supporter pour l'obtenir. Dans le cas de la lutte contre l'effet de serre, ces avantages et ces coûts sont de forte intensité et l'effort de réduction a vocation à modifier le système de prix de l'économie et les stratégies des acteurs en matière de recherche et d'investissement ;
- Il faut faire porter l'effort là où il est le moins coûteux à obtenir, c'est-à-dire tant que le coût de réduction des émissions est inférieur à la valeur de référence ;
- Il convient de valoriser clairement dans les calculs de rentabilité des projets d'investissements publics les gains sur l'effet de serre qu'on obtient ou qu'on obtiendra dans le futur au regard des coûts consentis par la collectivité.

Ce référentiel carbone peut à la fois orienter l'action publique et constituer un élément d'information pour les agents économiques privés en leur donnant de la visibilité sur les orientations publiques de moyen-long terme.

2.1. Un référentiel pour valoriser l'effet de serre dans l'évaluation de la rentabilité des projets d'investissements publics

Le calcul socioéconomique des investissements de transport sera sans doute le premier utilisateur de ce référentiel. L'enjeu est de valoriser la réduction ou l'augmentation des émissions de CO₂ dans l'exercice de programmation des infrastructures. La lettre de saisine du Premier ministre évoque plus précisément la réévaluation de la valeur carbone qui doit permettre d'engager, suite au « Grenelle de l'environnement », la révision des schémas directeurs d'infrastructures à l'horizon 2025.

Cette question ne se pose pas uniquement pour le secteur des transports, même si le calcul économique y est de fait pratiqué de manière systématique. L'ensemble des infrastructures va devoir en effet intégrer l'impératif de la lutte contre l'effet de serre et anticiper les impacts du changement climatique :

- dans le secteur de l'habitat, les architectes vont devoir construire des bâtiments à faible intrant net d'énergie ou à énergie positive, tout en prévoyant leur adaptation à un large spectre de variation des températures, de la pluviométrie et des événements extrêmes sur plus de 100 ans ;
- dans le secteur de l'électricité, les producteurs devront s'engager résolument vers des énergies alternatives (et/ou le stockage du carbone), tout en tenant compte de l'évolution de la disponibilité en eau et du niveau de la mer sur la durée de vie d'une centrale (60 ans). Les gestionnaires des réseaux de transmission et de distribution d'énergie devront minimiser les pertes en ligne tout en accroissant la résilience des équipements aux aléas climatiques ;
- dans le transport, des offres crédibles alternatives à l'automobile individuelle et au transport aérien devront émerger. Les projets d'investissement public sont nombreux : contournements autoroutiers et ferroviaires, nouvelles lignes ferroviaires à grande vitesse, axes fluviaux. Ce coût doit être contrebalancé par les gains effectifs de réduction des émissions de CO₂ que ces offres peuvent dégager à long terme.

Il est clair que la monétarisation du CO₂, même après prise en compte de l'augmentation recommandée dans ce rapport, ne changera pas à elle seule le calcul de rentabilité socioéconomique de telle ou telle infrastructure, qui dépendra en grande partie des gains de temps et de la manière dont on évalue les effets d'agglomération. Mais cette référence carbone peut permettre au décideur de confronter les avantages retirés en termes de CO₂ à d'autres avantages comme les gains de temps généralement décisifs dans les calculs. Il est ainsi assez facile, projet par projet, de calculer le coût qui est supporté pour réduire une tonne de CO₂ et de comparer cette valeur à ce référentiel et à d'autres projets où ce coût pourrait par exemple être plus faible. Ce référentiel carbone concerne à ce titre la puissance publique mais aussi les partenaires privés avec lesquels elle s'engagera dans les secteurs d'infrastructures.

2.2. Un instrument pour définir et évaluer l'efficacité des grandes politiques publiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Ce référentiel constitue un ingrédient essentiel de l'évaluation des politiques publiques à un double titre :

- d'abord parce qu'il doit aider à la définition des grandes stratégies nationales en matière d'urbanisme, d'aménagement du territoire, de transport ou d'énergie. Ces stratégies ont en effet une incidence de long terme, voire de très long terme, sur l'économie. À cet horizon, la valeur du carbone a vocation à jouer un rôle essentiel, d'autant plus que cette valeur n'est pas, comme on le verra, « écrasée » par l'actualisation ;
- ensuite pour évaluer des mesures plus ciblées de politiques publiques qu'il convient de développer si l'on veut maîtriser les coûts économiques de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La dimension climatique d'une politique publique peut être évaluée à travers son coût à la tonne de CO₂ évitée. Ce coût peut alors être comparé à la valeur tutélaire définie. Concrètement, cela peut se traduire par la diffusion de l'indicateur de rentabilité en euro par tonne de CO₂ évitée dans les études d'impact, venant s'ajouter aux autres critères d'appréciation (approche qualitative tenant compte du degré de structuration des filières industrielles, nombre d'emplois créés, etc.).

Cette valeur peut ainsi être utilisée pour l'évaluation :

- des dépenses fiscales ;
- de la réglementation thermique dans les bâtiments ;
- de la politique de soutien aux agro-carburants ;
- des normes applicables aux véhicules (abaissement des émissions, utilisation des agro-carburants, limitation de vitesse) ;
- des tarifs d'achat de l'électricité renouvelable.

Elle peut aussi contribuer à enrichir les politiques d'information pour permettre au consommateur de mieux évaluer l'incidence environnementale des produits. Le « Grenelle de l'environnement » a retenu par exemple l'étiquetage des produits de consommation courante afin d'indiquer leur coût en carbone. On peut ainsi imaginer des étiquetages indiquant les émissions de CO₂ et la valeur monétaire associée : une voiture qui émet près de 120 g CO₂/km coûte à la planète (en retenant la valeur proposée dans ce rapport de 32 euros par tonne de CO₂) quatre centimes d'euro tous les dix kilomètres.

2.3. Une référence pour le calibrage des instruments de régulation économique

Les émissions de CO₂ constituent une « externalité négative », c'est-à-dire une somme d'effets indésirables auxquels le marché est incapable d'attribuer spontanément une valeur marchande. Le rôle des pouvoirs publics est de réintégrer dans le système de prix d'un marché concurrentiel la valeur des coûts induits par les émissions de carbone, afin que producteurs et consommateurs tiennent compte dans leurs choix et leurs comportements des coûts socioéconomiques découlant de leur contribution à l'effet de serre.

La valeur du carbone a donc vocation à servir de référence aux pouvoirs publics dans la définition et le calibrage des instruments économiques visant à orienter par les prix et les incitations financières les comportements des entreprises et des ménages. Un tel référentiel ne peut cependant prétendre fixer mécaniquement en tant que tel le niveau de la fiscalité environnementale, pour quatre raisons :

- la valeur du carbone peut être internalisée au travers d'une grande variété d'instruments économiques : taxes, marchés de permis, normes et réglementations imposées aux logements ou aux véhicules, péages, certificats verts, *bonus malus*, subventions à la R & D « verte » ;
- la valeur du carbone peut être internalisée de manière différenciée entre les secteurs économiques, pour tenir compte de considérations de compétitivité ou d'inertie des équipements ;
- la montée en puissance des instruments économiques de lutte contre le changement climatique doit tenir compte de leur incidence économique et sociale et de leurs effets redistributifs ;
- les pays consommateurs de pétrole doivent par ailleurs gérer un conflit de partage de rentes avec les pays producteurs. La structure et le fonctionnement du marché du pétrole sont en effet très loin d'une situation de concurrence parfaite, si bien que les prix ne reflètent pas seulement les coûts de production ou la rente de ressources naturelles, mais aussi une stratégie d'offre des producteurs. Dans un tel contexte, la fiscalité sur le pétrole constitue le moyen pour les pays consommateurs de récupérer une partie de la rente pétrolière. Réciproquement, on ne peut exclure que les prix du pétrole incorporent une anticipation du plafonnement des émissions de CO₂ et le souhait des producteurs de « capter » à la source une partie de la valeur du carbone.

2.4. Un signal pour les choix de R & D et d'investissement des entreprises

Le secteur privé, qui financera une grande partie des investissements dans l'énergie, les transports, le bâtiment et l'agriculture dans les années qui viennent, n'a qu'une visibilité très partielle sur la valeur du carbone à moyen et long terme, et donc sur le rendement des capitaux investis. Faute de signaux adéquats, le stock d'équipements et d'infrastructures risque de prolonger l'usage de technologies peu efficaces du point de vue de l'effet de serre. La construction d'une valeur de référence du carbone et la programmation de son évolution au cours du temps ont précisément pour objet d'améliorer la lisibilité de l'action publique et d'offrir ainsi à l'ensemble des acteurs économiques un environnement propice aux investissements sobres en carbone.

La valeur tutélaire n'affecte pas directement le bilan financier des décisions privées. Elle donne aux ménages et aux entreprises une information fiable et transparente sur le niveau d'ambition (et de contrainte) que se fixe le pays à moyen et long terme. Pour les entreprises, c'est le signal par exemple que, sous des formes qu'il appartient aux pouvoirs publics de définir, les émissions de gaz à effet de serre se verront dans le futur appliquer un prix qui n'est pas

simplement un prix fictif. C'est le signal que le développement de nouvelles technologies plus sobres en carbone peut présenter de bonnes perspectives de rentabilité.

3. Les travaux de la commission

3.1. L'organisation de la commission et de ses travaux

Le Centre d'analyse stratégique, suite à la lettre de saisine du Premier ministre, a mis en place début janvier 2008 une commission, présidée par Alain Quinet. Figurent dans cette commission un ensemble d'experts de l'université, du CNRS, de l'AIE et de l'OCDE, d'économistes de l'administration française et des représentants des principaux acteurs du « Grenelle de l'environnement » (voir en annexe la composition du groupe). Elle a tenu plusieurs réunions plénières et une série de réunions restreintes avec les économistes et les équipes de modélisation.

Plusieurs personnalités extérieures ont été auditionnées :

- Marcel Boiteux, président d'honneur d'EDF, qui avait notamment présidé en 2001 la commission « *Transports : choix des investissements et coût des nuisances* » ;
- Jean-Pierre Landau, second sous-gouverneur de la Banque de France, président du groupe de travail sur « *Les instruments économiques du développement durable* » (2007) ;
- Jean-Marc Burniaux, expert des questions énergétiques à l'OCDE ;
- Henri Prévot, ingénieur général des Mines.

Plusieurs membres du groupe ont proposé des réflexions qu'on trouvera dans le tome 2 de ce rapport et qui ont largement alimenté les discussions.

- Dominique Bureau : Prix de référence du CO₂ et calcul économique ;
- Olivier Godard : Hotelling or not Hotelling, Comment calibrer la politique française de l'effet de serre à long terme ? ;
- Christian Gollier : Les incertitudes - progrès technique et réversibilité ;
- Joël Maurice : La valeur socio-économique du carbone ;
- Katheline Schubert : La valeur du carbone : niveau initial et profil temporel optimaux.

Le comité de pilotage du groupe de travail (président et rapporteurs) a par ailleurs organisé plusieurs rencontres :

- une discussion avec la Commission européenne (DG Énergie et Transports, DG Environnement et DG Affaires économiques et financières) ;
- un séminaire de travail à l'École d'économie de Toulouse animé par Jean Tirole et Christian Gollier ;
- une rencontre avec les organisations syndicales.

Suite à un appel d'offres, trois laboratoires ont été retenus pour effectuer les travaux de modélisation :

- le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)¹ – modèle IMACLIM-R. L'équipe est constituée de Jean-Charles Hourcade, Renaud Crassous, Olivier Sassi et Henri Waisman ;
- le Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale (LEPII)², université de Grenoble en collaboration avec ENERDATA – modèle POLES. L'équipe est constituée pour le LEPII de Patrick Criqui et Silvana Mima et pour ENERDATA de Bertrand Château et Alban Kitous ;
- la société C-ORDEE, basée à Genève – modèle GEMINI-E3³. L'équipe est constituée d'Alain Bernard, Marc Vielle et Alain Haurie.

3.2. La logique de construction du rapport

Le rapport est structuré de la manière suivante :

- il rappelle le nouveau contexte international, marqué notamment par les progrès des connaissances scientifiques et des négociations internationales sur le changement climatique, ainsi que par l'émergence de marchés du carbone (chapitre 2) ;
- il présente les différentes approches possibles pour définir une valeur tutélaire du carbone (chapitre 3) ;
- il revient sur les fondamentaux économiques du débat sur la valeur carbone (chapitre 4) qui conduisent à recommander une valeur unique et croissante dans le temps ;
- il explicite les travaux de modélisation effectués par les équipes de modélisation spécifiquement mobilisées par cette commission (chapitre 5) et l'usage raisonné qui en est fait ;
- enfin, le chapitre 6 propose la chronique de valeurs du carbone que la commission recommande, tout en évaluant la sensibilité du résultat aux hypothèses sur les prix des énergies fossiles.

(1) <http://www.centre-cired.fr/>.

(2) <http://webu2.upmf-grenoble.fr/LEPII/spip/>.

(3) <http://gemini-e3.epfl.ch/>.

Chapitre 2

Le nouveau contexte international de la lutte contre le changement climatique

Tout exercice d'évaluation ou de réévaluation de la valeur du carbone s'inscrit dans un contexte scientifique, économique et géopolitique donné. Le référentiel « carbone » véhicule l'état des connaissances scientifiques, les incertitudes et les convictions de la société.

En 2001, date de publication du rapport Boiteux, le contexte international était marqué :

- par l'adoption du protocole de Kyoto pour la période 2008-2012, sans garanties fermes sur son entrée en vigueur effective ;
- par la sédimentation du « savoir climatique » dans la perspective du 3^e rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC¹) ;
- le tout dans une situation où les prix du pétrole peuvent rétrospectivement être qualifiés de faibles.

Ce contexte international s'est profondément modifié depuis 2001. Ce chapitre fait le point sur les évolutions les plus significatives pour l'exercice de réévaluation de la valeur carbone engagé par la commission.

1. L'avancée des travaux scientifiques autour de l'effet de serre et du changement climatique

1.1. Un objet scientifique mieux balisé : le rôle essentiel des travaux du GIEC

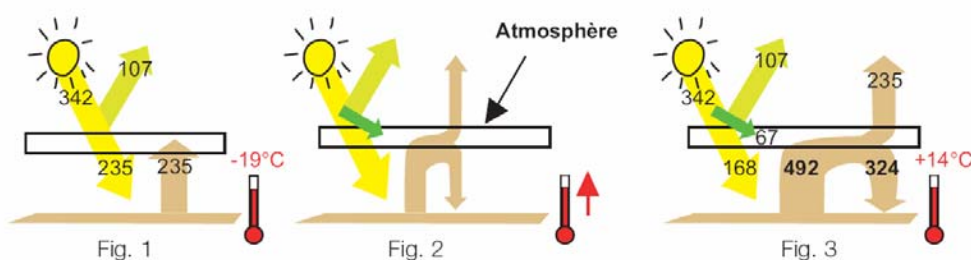
L'effet de serre est un phénomène physique dont la nature, les origines et les conséquences, ainsi que les implications économiques, sont désormais solidement établies, même s'il reste des incertitudes sur l'intensité du phénomène².

Le schéma qui suit illustre la manière dont le rayonnement solaire réfléchi par la surface de la terre se retrouve en partie « piégé » dans la couche gazeuse opaque de l'atmosphère, modifiant ainsi de façon naturelle l'équilibre thermique de la planète.

(1) L'appellation du GIEC anglaise est IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change.

(2) Nous n'entrons pas ici dans le détail : on trouvera de plus amples informations notamment sur le site de l'IPCC (<http://www.ipcc.ch>), qui met à disposition de nombreux travaux. Voir également <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>.

Graphique n° 1 : Représentation schématique des échanges de flux constitutifs de l'effet de serre



Source : d'après GIEC, 4^e rapport du premier groupe de travail, 2007

Les données présentées ici traduisent les flux d'énergie et sont exprimées en watt par mètre carré.

Dans la première figure (état initial virtuel), l'atmosphère ne contient pas de gaz à effet de serre. L'énergie fournie par les rayonnements du soleil est absorbée par la terre et la réchauffe. La terre re-émet la même quantité d'énergie sous forme de rayonnements infrarouges, ce qui assure son équilibre énergétique. En l'absence de gaz à effet de serre, la température terrestre serait de - 19° C.

Dans la seconde figure (phase transitoire), une partie des rayons infrarouges est renvoyée vers le sol par les gaz à effet de serre, augmentant alors la température de la terre qui s'accroît jusqu'à ce que l'énergie réémise égale l'énergie reçue.

Dans la troisième figure (état actuel), la présence de gaz à effet de serre conduit à l'augmentation de la température au sol qui atteint en moyenne + 14° C. Ce mécanisme naturel est amplifié par l'augmentation des gaz à effet de serre produits par les activités humaines et particulièrement par l'augmentation des émissions de CO₂ qui perturbent le cycle naturel du carbone en modifiant les flux échangés entre l'atmosphère, la biosphère (matière organique des êtres vivants), les océans et la lithosphère (roche, sédiments, combustibles fossiles). Pour ces raisons, la température de l'atmosphère a ainsi augmenté au cours de l'ère industrielle.

Les rapports successifs du GIEC ont largement contribué à affiner et à diffuser la question du changement climatique, en particulier en mettant en évidence l'influence déterminante des activités humaines dans la déstabilisation du climat, au travers des liens complexes qui unissent les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, la déformation de la composition gazeuse de l'atmosphère et les probabilités associées d'augmentation des températures.

Le rôle du GIEC

Le GIEC est un organe intergouvernemental créé en 1988 à la demande du G7 sous l'égide de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Il a pour mission d'évaluer et d'actualiser à intervalles réguliers l'état des connaissances d'ordre scientifique, technique et socioéconomique nécessaires pour mieux appréhender les risques liés au changement climatique d'origine humaine et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et de réduction des émissions. Ses évaluations sont fondées sur des publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est reconnue dans des évaluations par les pairs.

Le GIEC tient une assemblée plénière une fois par an, au cours de laquelle il prend des décisions concernant sa structure, son programme de travail, les principes et procédures qu'il entend appliquer, et procède à l'élection de son président et de son bureau. À cette occasion, il approuve les rapports établis. Ces assemblées réunissent habituellement des centaines de représentants des gouvernements et des organisations participantes. Le GIEC se compose de trois groupes de travail spécialisés respectivement dans les aspects scientifiques de l'évolution du système climatique (I), l'évaluation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation (II) et l'analyse des potentiels et des coûts associés aux politiques d'atténuation, c'est-à-dire de réduction à la source des émissions de gaz à effet de serre (III).

Le GIEC a produit à ce jour quatre rapports successifs dits d'évaluation (1990, 1995, 2001, 2007), qui synthétisent l'état de l'art de l'expertise scientifique et socioéconomique, nationale et internationale, dans le domaine de l'effet de serre.

Les concentrations¹ de gaz à effet de serre dans l'atmosphère se sont considérablement accrues depuis la révolution industrielle (379 ppm² pour le CO₂ en 2005 contre 280 dans l'ère préindustrielle, 1 774 ppb pour le méthane contre 715 ppb auparavant³, 319 ppb pour le protoxyde d'azote contre 270 ppb auparavant), au point de « sortir » du spectre normal de variation des concentrations observé ou reconstitué au cours des 650 000 dernières années.

L'influence de l'homme est tout à fait prépondérante dans cette évolution, si l'on en croit le 4^e rapport d'évaluation (AR4 – *Fourth Assessment Report*) publié en novembre 2007 par le GIEC : les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, en forte croissance (49 milliards de tonnes équivalent CO₂ en 2004 contre 28,1 GteCO₂ en 1970), auraient provoqué par leur cumul un réchauffement « brut » de la surface terrestre de l'ordre de + 2,3 watts par m² depuis 1750, selon un rythme d'augmentation inédit au cours des 10 000 dernières années. Par

(1) Les gaz à effet de serre ne se limitent pas au CO₂ mais incluent d'autres gaz à effet de serre comme la vapeur d'eau (H₂O), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone (O₃) ainsi que les gaz à effet de serre industriels fluorés comme les chlorofluorocarbures (CFC) et HCFC-22 comme le fréon, le perfluorométhane (CF₄), l'hexafluorure de soufre (SF₆). On ramène ces gaz à un équivalent CO₂ sur la base de leur contribution au réchauffement climatique. Les objectifs de réduction des concentrations de CO₂ envisagés (450, 550) peuvent concerner le seul CO₂ mais ils sont généralement exprimés en CO₂ équivalent, ce qui s'écrit 450ppme, 550 ppme. Voir le tableau n° 3.

(2) Au sens strict, une partie par million représente un rapport de 10⁻⁶. 379 ppm signifie 379 centimètres cube de CO₂ par mètre cube d'air. La notion de partie par million équivalent CO₂ (ppme) tient compte du pouvoir de réchauffement global (PRG) du gaz considéré, qui désigne le facteur par lequel il faut multiplier la masse dudit gaz pour obtenir une masse de CO₂ produisant un impact équivalent sur l'effet de serre, compte tenu de la durée de vie du gaz dans l'atmosphère.

(3) Ppb signifie « part per billion » en anglais, soit un rapport de 10⁻⁹.

comparaison, le forçage radiatif¹ dû au seul rayonnement solaire ne serait que de +0,12 W/m². À titre d'illustration, 11 des 12 dernières années (1995-2006) figurent parmi les années les plus chaudes depuis que les mesures de températures sont disponibles au niveau mondial (1850). La planète s'est réchauffée de +0,74° C entre 1906 et 2005, avec un rythme d'accroissement qui a doublé sur les cinq décennies de la période 1956-2005.

Les travaux du GIEC ont permis d'établir, sur une base probabiliste, une table de correspondance entre les émissions de gaz à effet de serre, la composition gazeuse de l'atmosphère et l'augmentation future des températures.

Tableau n° 3 : Table de correspondance entre émissions, concentration et augmentation des températures

Catégories	Effet radiatif	Concentration en CO ₂	Concentration en CO ₂ eq	Augmentation moyenne des températures par rapport à l'ère pré-industrielle	Année d'émission maximale (année d'inflexion des émissions)	Émissions globales de CO ₂ en 2050 rapportées à l'année 2000	Nombre de scénarios évalués
	W/m ²	Ppm	Ppm	° C	Année	%	
I	2,5 – 3,0	350 – 400	445 – 490	2,0 – 2,4	2000 – 2015	-85 à -50	6
II	3,0 – 3,5	400 – 440	490 – 535	2,4 – 2,8	2000 – 2020	-60 à -30	18
III	3,5 – 4,0	440 – 485	535 – 590	2,8 – 3,2	2010 – 2030	-30 à +5	21
IV	4,0 – 5,0	485 – 570	590 – 710	3,2 – 4,0	2020 – 2060	+10 à +60	118
V	5,0 – 6,0	570 – 660	710 – 855	4,0 – 4,9	2050 – 2080	+25 à +85	9
VI	6,0 – 7,5	660 – 790	855 – 1 130	4,9 – 6,1	2060 – 2090	+90 à +140	5
TOTAL							177

Source : d'après GIEC 2007²

Le GIEC a construit des scénarios stylisés pour simuler l'évolution des émissions humaines de gaz à effet de serre d'ici à 2100. Chacun de ces scénarios fait l'objet d'explications détaillées dans le rapport dit SRES de 2000 (*Special Report on Emission Scenarios*) et traduit des hypothèses différentes sur la croissance économique et démographique mondiale, le rattrapage des pays en développement, la qualité environnementale et la diffusion des technologies.

Ces scénarios³ conduisent à des projections contrastées d'émissions de gaz à effet de serre (exprimées en GtCO₂eq) d'ici à la fin du XXI^e siècle, comme le montre le graphique n° 2.

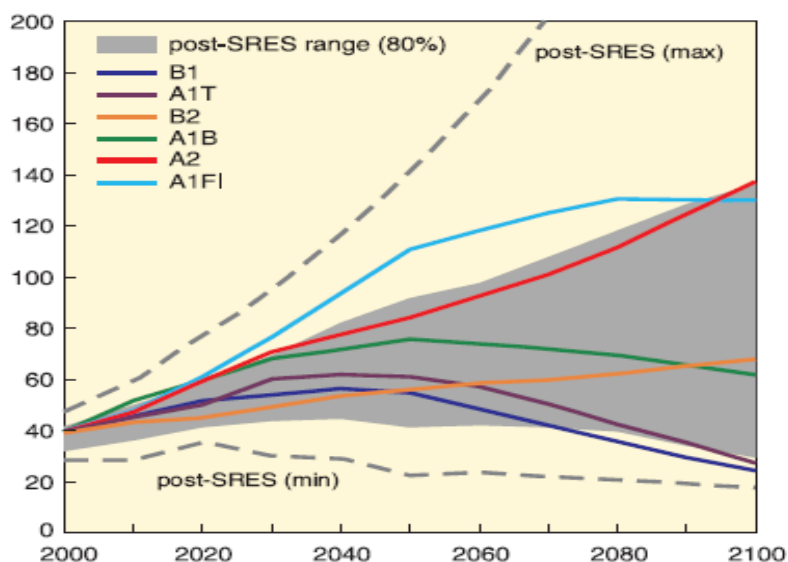
(1) Le forçage radiatif est approximativement défini comme la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique donné. Un forçage radiatif positif tend à réchauffer le système (plus d'énergie reçue qu'émise), alors qu'un forçage radiatif négatif va dans le sens d'un refroidissement (plus d'énergie perdue que reçue). Si l'on considère la Terre comme un système climatique, les causes possibles de forçage radiatif sont une modification du rayonnement solaire incident ou les effets de variation des quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

(2) Le lecteur est invité à se reporter au rapport de l'IPCC (IPCC, 2007, p. 15) pour les détails de la construction de ce tableau.

(3) Les différents scénarios présentés dans ce graphique renvoient aux hypothèses suivantes : A1 suppose un monde avec une forte croissance économique, un pic de la population mondiale au milieu du XXI^e siècle, et l'introduction et la diffusion rapide de technologies efficaces, avec prédominance des sources d'énergie fossiles (variante A1FI), des énergies alternatives (A1T) ou un mix équilibré des deux (A1B) ; B1 fait l'hypothèse d'une forte convergence des niveaux de vie au plan mondial et introduit des mutations dans la structure des systèmes économiques (essor des services et des TIC) ; B2 se fonde sur

Dans les scénarios les plus « pessimistes » (dits de catégorie VI), les émissions mondiales de gaz à effet de serre pourraient doubler d'ici à 2050, avec comme conséquence un quasi-triplement des concentrations atmosphériques en 2100 (855-1 130 ppm contre 379 ppm aujourd'hui) et un réchauffement de l'ordre de 4,9 à 6,1° C à la fin du siècle par rapport aux températures préindustrielles.

Graphique n° 2 : Les émissions de gaz à effet de serre selon les différents scénarios¹ du GIEC
Giga tonne de CO₂ eq/an



Source : GIEC 2007, Climate Change 2007, Synthesis Report

1.2. Les enjeux économiques du dérèglement climatique

Les conséquences des dérèglements climatiques sont étayées par les observations passées et par la capacité prédictive des modèles, en termes de qualification des dommages (disparition d'espèces, submersion des zones côtières en raison de la montée des eaux, tensions accrues sur la production agricole et l'approvisionnement alimentaire dans les pays en développement, etc.) et de valorisation économique des effets du réchauffement. On trouve dans le tableau n° 4 une description des impacts potentiels tels qu'ils sont appréhendés aujourd'hui.

une croissance économique plus modérée, sur un dynamisme moins grand de la population mondiale, dans un contexte de repli régional (fragmentation du monde) ; A2 parie sur un monde très hétérogène, avec un fort accroissement démographique, une croissance économique ralentie et un certain pessimisme sur le progrès technique.

(1) Émissions annuelles mondiales en l'absence de politiques additionnelles, pour six scénarios SRES et une gamme de scénarios plus récents (post-SRES).

Tableau n° 4 : Les impacts potentiels du réchauffement climatique selon le niveau de températures atteint

Hausse T	Eau	Alimentation	Santé	Zones continentales	Environnement/biodiversité	Ruptures
1°	Disparition des petits glaciers andins avec une menace sur les ressources en eau pour 50 millions de personnes	IMPACTS POSITIFS Léger accroissement des rendements céréaliers dans les zones tempérées	300 000 morts chaque année liées au changement climatique (malaria, diarrhée, malnutrition) Réduction de la mortalité hivernale en Europe du Nord et aux États-Unis	Fonte du permafrost causant des dégâts aux routes et aux bâtiments en Russie et au Canada	Au moins 10 % des espèces répertoriées menacées d'extinction Dommages irréversibles à 80 % des récifs coralliens (dont la Grande Barrière de Corail)	Ralentissement de la circulation thermohaline dans l'océan Atlantique
2°	Diminution de 20 % à 30 % des ressources en eau dans certaines zones vulnérables comme l'Afrique australe et la Méditerranée	Forte diminution des rendements de culture dans les zones tropicales (-5 % à -10 % en Afrique)	40-60 millions de personnes supplémentaires exposées à la malaria en Afrique	Jusqu'à 10 millions de personnes supplémentaires menacées par la submersion des zones côtières	15 % à 40 % des espèces menacées d'extinction dont certaines en milieu arctique (caribou, ours polaire)	Fonte accélérée de la banquise au Groenland avec un risque de hausse du niveau des océans de 7 m
3°	Graves sécheresses en Europe méridionale tous les 10 ans en moyenne 1-4 Mds d'êtres humains supplémentaires touchés par des pénuries d'eau	150-550 millions d'êtres humains supplémentaires menacés de famine Rendement agricoles en haute altitude culminent	1-5 millions de personnes en plus souffrant de malnutrition (si l'effet fertilisant du carbone dans les sols diminue)	Jusqu'à 170 millions de personnes en plus menacées par la submersion des zones côtières	20 % à 50 % des espèces menacées d'extinction (25 % à 60 % des mammifères, 30 % à 40 % des oiseaux et 15 % à 70 % des papillons en Afrique du Sud) Déclin avancé de la forêt amazonienne	Risque croissant d'événements imprévisibles dans les courants atmosphériques (moussons...) Risque croissant d'effondrement de la couche de glace dans l'Antarctique Ouest (d'où une hausse supplémentaire du niveau des océans)
4°	Diminution de 30 % à 50 % des ressources en eau en Afrique australe et en Méditerranée	Pertes de rendements de 15 % à 35 % en Afrique et cessations de production dans certaines régions (Australie...)	80 millions de personnes supplémentaires exposées à la malaria en Afrique	Jusqu'à 300 millions de personnes en plus menacées par la hausse du niveau des océans	Disparition de la moitié de la toundra Plus de la moitié des réserves naturelles sont incapables de respecter leurs objectifs de conservation	Risque croissant d'une rupture dans la circulation thermohaline dans l'Océan atlantique
5°	Fonte des glaciers dans l'Himalaya affectant 1/4 de la population chinoise et plusieurs millions d'Indiens	Augmentation continue de l'acidité océanique menaçant les écosystèmes marins et les ressources halieutiques		Graves menaces sur les petites îles, les zones côtières comme la Floride et des grandes villes comme New York, Londres, Tokyo		
Sup. à 5°	Les modèles actuels sont incapables de rendre compte des effets dévastateurs d'une telle hausse des températures en raison de leur ampleur exceptionnelle					

Source : Rapport Stern

Certains économistes (notamment William Nordhaus¹ et Richard Tol) ont tenté au cours des dernières années d'évaluer sur une base chiffrée le coût de l'effet de serre, élargissant ainsi le champ de l'analyse économique au-delà de la simple évaluation des coûts de réduction des émissions. Le rapport de Sir Nicholas Stern pour le Trésor britannique a reformulé les chiffres existants, au regard notamment de l'incertitude qui pèse sur la gravité des dommages futurs. Face au risque accru, mais non parfaitement probabilisable, d'événements brutaux et catastrophiques (ralentissement du *Gulf Stream*, fonte de la banquise antarctique, etc.), le rapport recommande en substance de se constituer dès aujourd'hui une « épargne de précaution », c'est-à-dire de limiter à la source les émissions de gaz à effet de serre, pour éviter de surexposer les générations futures à des dommages d'une ampleur inédite et potentiellement irréversibles.

2. Le traitement international de l'effet de serre et les incertitudes à venir

Le climat mondial est un bien collectif qui appelle donc un engagement des gouvernements des principaux pays émetteurs de gaz à effet de serre. Cet engagement se heurte de fait à de nombreuses difficultés, même si certains des outils permettant de faire face à ce défi se mettent progressivement en place. Ces éléments sont décisifs pour l'élaboration d'une valeur tutélaire du carbone, car ce dernier dépend en grande partie des décisions qui seront prises par la communauté internationale. On peut revenir ici sur quelques points permettant d'apprécier le chemin parcouru et les problèmes qui se posent aujourd'hui pour aller plus loin dans l'engagement international contre le changement climatique.

2.1. La dynamique créée par le protocole de Kyoto

Les dispositions du protocole de Kyoto, adopté en 1997 et entré en vigueur au 1^{er} janvier 2005, constituent une traduction opérationnelle condensée du schéma optimal qu'il faudrait mettre en œuvre pour lutter efficacement contre le réchauffement de la planète. Elles contiennent en effet les principaux ingrédients du « succès » :

- d'une part, des engagements quantifiés et contraignants de limitation des émissions en volume, pour une quarantaine de pays dits de l'Annexe B s'étant astreints à réduire leurs émissions en 2008-2012 par rapport à 1990 ;
- d'autre part, des mécanismes économiques favorisant une répartition efficace de l'effort à travers l'émergence d'un signal-prix sur le carbone. Les États « contraints » et les entreprises relevant de leur juridiction ont ainsi la faculté de réduire d'eux-mêmes leur propre « empreinte carbone » ou de financer l'effort d'abattement équivalent en achetant des permis à l'étranger, l'arbitrage dépendant pour chaque acteur de ses coûts marginaux de réduction comparés au prix des permis. C'est sur ce fondement que l'Union européenne a décidé de mettre en place à partir de 2005 le système d'échange de quotas d'émissions de CO₂ (ETS : *European Trading Scheme*) sur lequel on reviendra.

Le tableau n° 5 indique les principales étapes de cette prise de conscience depuis une vingtaine d'années.

(1) On trouvera plus loin une présentation de ces travaux, notamment sur le point spécifique fait autour des débats introduits récemment dans le rapport Stern et dans une présentation assez large des valeurs carbonées produites dans les travaux internationaux de ces dernières années.

Tableau n° 5 : Les grandes étapes de la négociation internationale

1990	<i>Dépôt du 1^{er} rapport d'évaluation du GIEC</i>	
1992	Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement – Rio de Janeiro	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)
1994	Entrée en vigueur de la CCNUCC	
1995	<i>Dépôt du 2^e rapport d'évaluation du GIEC</i>	
	COP 1 – Berlin	Mandat de Berlin
1996	COP 2 – Genève	
1997	COP 3 – Kyoto	Protocole de Kyoto
1998	COP 4 – Buenos Aires	Plan d'action de Buenos Aires Échéancier de mise en œuvre du Protocole
1999	COP 5 – Bonn	
2000	COP 6 – La Haye	
2001	Dépôt du 3 ^e Rapport d'évaluation du GIEC	
	COP 6 de reprise – Bonn	Accords de Bonn : Entente sur la mise en œuvre du Protocole
	COP 7 – Marrakech	Accords de Marrakech : finalisation des détails techniques relatifs au Protocole de Kyoto
2002	Sommet mondial pour le développement durable – Johannesburg	Examen des progrès accomplis depuis 1992
	COP 8 – New Delhi	Déclaration de Delhi
2003	COP 9 – Milan	
2004	COP 10 – Buenos Aires	Programme de travail de Buenos Aires : entente sur les mesures d'adaptation et de riposte
2005	Entrée en vigueur du Protocole de Kyoto	
	COP 11 – Montréal	
	COP/MOP 1 – Montréal	Lancement des groupes de travail sur le futur régime (Dialogue et Gts)
2006	COP 12 – Nairobi COP/MOP 2 – Nairobi	Programme de travail de Nairobi sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation
2007	Dépôt du 4 ^e Rapport d'évaluation du GIEC COP 13 – Bali COP/MOP 13 – Bali	

Source : Mission interministérielle de l'effet de serre (<http://www.effet-de-serre.gouv.fr>)

2.2. Les incertitudes sur la suite des engagements internationaux

Malgré le consensus solide sur lequel s'appuie la lutte contre l'effet de serre, les 189 États parties à la Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique n'ont, jusqu'à présent, pas pu se mettre d'accord sur un objectif quantitatif à long terme, fût-il exprimé en émissions de gaz à effet de serre, en plafonds de concentrations atmosphériques ou en hausse maximale admise des températures.

On ne dispose pas, non plus, d'un instrument unique de tarification du carbone à l'échelle mondiale qui permettrait de diriger l'effort de réduction des émissions des gaz à effet de serre vers les pays et les secteurs d'activité où cela est le plus facile et le moins coûteux.

Pour innovante et prometteuse qu'elle soit, la « boîte à outils » du protocole de Kyoto reste donc très incomplète. Les objectifs chiffrés des pays de l'Annexe B ne concernent que 30 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (essentiellement Union européenne, Japon, Canada et récemment Australie), les États-Unis ayant préféré rester à l'écart en l'absence d'engagements symétriques de la part des grands pays émergents. Or l'efficacité de la lutte contre le changement climatique repose sur l'engagement solidaire des principaux pays émetteurs de gaz à effet de serre, autrement dit les États-Unis, la Chine et l'Inde, qui seront à l'origine des deux tiers de l'augmentation des émissions mondiales de CO₂ d'ici à 2030 (source : AIE 2007).

Les négociations qui ont débuté au sein de l'ONU fin mars-début avril 2008 à Bangkok, pour s'achever en principe fin 2009 à Copenhague dans le cadre du plan d'action de Bali (décembre 2007), décideront du cadre institutionnel de long terme que la communauté internationale souhaite se donner pour lutter contre le réchauffement climatique. Les négociations de Bali ont débouché sur un processus global et formalisé qui encadre les négociations jusqu'en 2009. Un certain nombre de décisions techniques ont pu être prises qui préfigurent les débats de fond qui vont maintenant s'engager pour préparer l'après-2012. Il n'en demeure pas moins qu'apparaissent, à l'occasion de ces négociations, plusieurs sujets difficiles :

- l'objectif optimal de réduction global des émissions de CO₂ ;
- la manière dont doivent être formulées les contributions respectives des pays développés et des pays en développement¹ ;
- la manière dont peuvent être associés à cet effort collectif les pays en développement ;
- la gouvernance de cet effort collectif (mesure des efforts, vérification et contrôle, etc.).

À ce stade, il ne semble pas acquis que le futur régime multilatéral de lutte contre le changement climatique après 2012 se cale sur la structure et les exigences du protocole de Kyoto. L'ensemble des protagonistes a intérêt à trouver une solution concertée au plan mondial, seul gage d'efficacité dans le respect de l'objectif ultime de la Convention-cadre des

(1) En raison de la très forte croissance de leurs émissions de gaz à effet de serre, les économies émergentes comme la Chine et l'Inde font face à des responsabilités nouvelles. Les simulations effectuées dans le groupe des économistes et qu'on trouvera dans les rapports des modélisateurs et notamment celui du CIRED autour des résultats d'IMACLIM montrent en effet que les pays émergents à forte croissance, ainsi que les économies pétro-dépendantes (Russie, Moyen-Orient), auront beaucoup plus à perdre en termes de croissance du PIB que les pays développés s'ils souscrivent à une feuille de route volontariste de réduction des émissions. La position dure que ces pays ont prise dans les négociations climatiques autour d'une forme de droit à compensation (financière et technologique) semble donc tout à fait rationnelle et légitime. Restent les inévitables complications pratiques lorsqu'on cherche à calculer précisément la part de l'effort additionnel qui ouvre droit à une prise en charge extérieure et à déterminer la nature des soutiens (transferts monétaires, « air chaud », conditions concessionnelles d'accès à certaines technologies clés, etc.).

Nations unies¹. Cependant, l'asymétrie entre les coûts et les bénéfices du changement climatique *perçus* par chacun des États pris isolément, ajoutée à l'hétérogénéité des préférences (tension contradictoire entre croissance économique et rationnement des émissions) et à l'incertitude sur le positionnement exact des autres partenaires, peut inciter à adopter un comportement de minimisation du risque et de « passager clandestin ».

La démarche unilatérale de l'Union européenne s'analyse comme une tentative de rupture de l'équilibre non coopératif pour aboutir à une solution concertée. Si l'Europe a dévoilé sa propre stratégie, sa contribution à l'atténuation des émissions ne peut être que faible (elle représente 11,8 % des émissions mondiales de CO₂ en 2000) et l'incertitude demeure sur les comportements respectifs, et sans doute interdépendants, des États-Unis et de la Chine. Cette situation comporte deux risques majeurs :

- d'une part, l'absence de garanties sur l'efficacité environnementale de la lutte contre l'effet de serre, *a fortiori* si les productions et les émissions ne font que se déplacer vers les États où la contrainte est faible ou inexistante (problématique des « fuites de carbone ») ;
- d'autre part, la mauvaise allocation des efforts au niveau mondial en raison de l'hétérogénéité et du cloisonnement des prix du carbone dans les différents États, qu'ils soient explicites (taxes, permis d'émission) ou « cachés » (normes réglementaires, crédits d'impôts, etc.).

2.3. Les objectifs de la France et de l'Union européenne

Les objectifs de la France et de l'Union européenne sont désormais affichés à l'horizon 2050 :

- la loi de programmation et d'orientation sur la politique énergétique du 13 juillet 2005² engage la France sur le sentier de ce qu'il est convenu d'appeler le « facteur 4 », c'est-à-dire une diminution de 75 % des émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport aux niveaux actuels, avec un cheminement en principe linéaire sur toute la période ;
- lors du Conseil européen des 8 et 9 mars 2007³, l'Union européenne s'est quant à elle dotée d'objectifs chiffrés contraignants de réduction de ses émissions de gaz à effet de

(1) Selon l'article 2 de la Convention, « l'objectif ultime [...] est de stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ».

(2) Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique. En son article 2, la loi POPE dispose que « la lutte contre le changement climatique est une priorité de la politique énergétique qui vise à diminuer de 3 % par an en moyenne les émissions de gaz à effet de serre de la France [...] la France soutient la définition d'un objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050, ce qui nécessite, compte tenu des différences de consommation entre pays, une division par quatre ou cinq de ces émissions pour les pays développés ». Dans sa version actuelle, l'article 2 du titre 1^{er} « Lutte contre le changement climatique » du projet de loi de programmation prévoit que « la France place la lutte contre le changement climatique au premier rang des priorités assignées à ses politiques nationale, européenne et internationale. Dans cette perspective, elle confirme son engagement de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050, afin de ramener à cet horizon ses émissions de gaz à effet de serre à un niveau inférieur à [140 millions de tonnes équivalent CO₂] ».

(3) Les articles des conclusions du Conseil européen des 8-9 mars 2007 :

« (art. 30) Le Conseil européen réaffirme que les engagements de réduction des émissions en valeur absolue constituent l'élément central d'un marché mondial du carbone. Les pays développés devraient continuer à montrer la voie en s'engageant à réduire collectivement leurs émissions de gaz à effet de serre de 30 % environ d'ici à 2020 par rapport à 1990. Ce faisant, ils devraient également viser à réduire collectivement leurs émissions de 60 % à 80 % d'ici à 2050 par rapport à 1990.

(art. 31) Dans ce cadre, le Conseil européen est favorable à ce que l'UE se fixe comme objectif de réduire de 30 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2020 par rapport à 1990, à titre de contribution à un

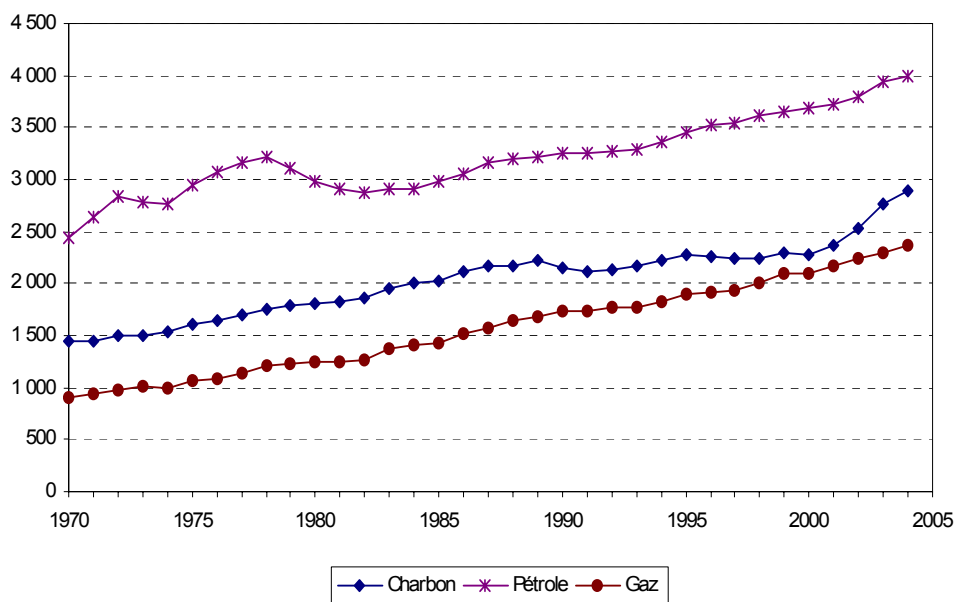
serre à l'horizon de 2020 (- 20 % a minima par rapport à 1990, - 30 % en cas d'accord international répondant à certains critères), avec une option à plus long terme de - 60 % à - 80 % en 2050 pour l'ensemble des pays développés.

Ces deux décisions permettent de disposer de « points fixes » pour calibrer les scénarios d'objectifs à moyen (2020) et long terme (2050) dont la valeur du carbone constituera la « valeur duale ».

3. Le changement de tendance dans l'évolution des prix de l'énergie

Selon le 4^e rapport d'évaluation du GIEC, les émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie (principalement issues de la combustion de sources fossiles pour la production de chaleur et d'électricité et pour le transport) représentent environ 70 % des émissions totales.

Graphique n° 3 : La consommation mondiale d'énergie primaire
en Mtep



Source : Observatoire de l'énergie

Le pétrole couvre aujourd'hui 35 % de la demande d'énergie dans le monde. Le gaz (21 %) et le charbon (25 %) jouent également un rôle important et qui est appelé à se renforcer au cours des deux prochaines décennies, dans la mesure où le charbon est plus abondant et son prix plus attractif.

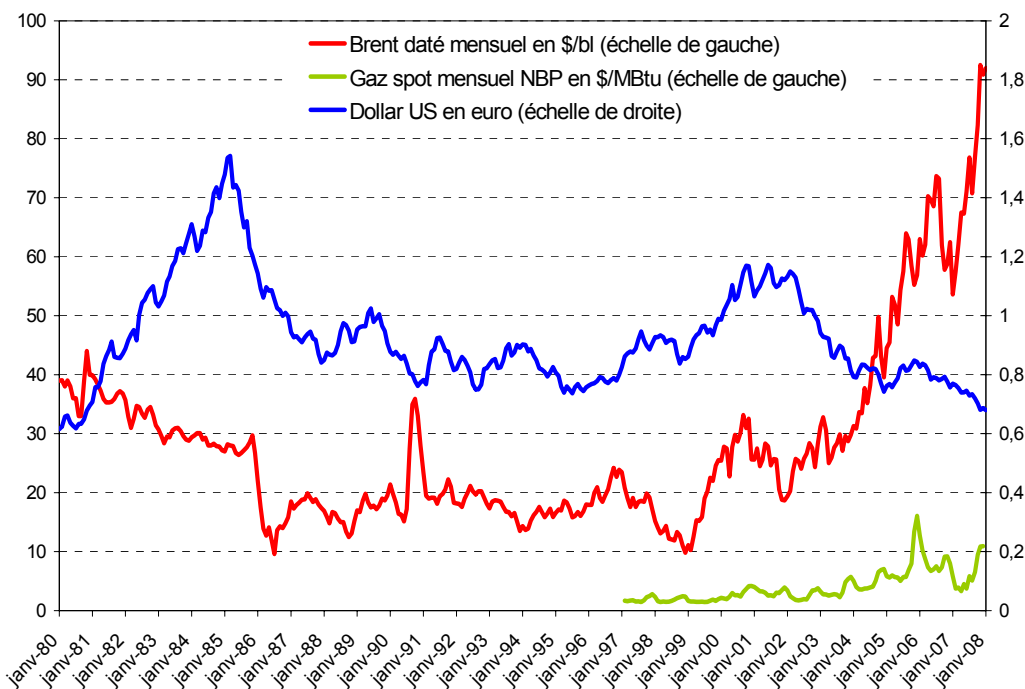
accord mondial global pour l'après-2012, pour autant que d'autres pays développés s'engagent à atteindre des réductions d'émission comparables et que les pays en développement plus avancés sur le plan économique apportent une contribution adaptée à leurs responsabilités et à leurs capacités respectives. Il invite ces pays à formuler des propositions concernant leur contribution à un accord pour l'après-2012.

(art. 32) Le Conseil européen souligne que l'UE est déterminée à faire de l'Europe une économie à haut rendement énergétique et à faible taux d'émission de gaz à effet de serre et décide que, jusqu'à la conclusion d'un accord mondial global pour l'après-2012 et sans préjudice de la position qu'elle adoptera dans les négociations internationales, l'UE prend, de manière indépendante, l'engagement ferme de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 20 % d'ici à 2020 par rapport à 1990. »

3.1. L'envolée des prix du pétrole

La valeur de référence préconisée par le rapport Boiteux avait été élaborée dans un contexte où le baril du pétrole s'élevait à 24 dollars en 2000 pour atteindre 36,5 dollars en 2030 (en dollars 2000). Depuis 2001, année de réalisation du rapport Boiteux, le prix du baril de pétrole a plus que triplé sur les marchés mondiaux, passant de 21 dollars en moyenne à 73 dollars en 2007, pour dépasser les 100 dollars début 2008. Les projections 2007 de l'Agence internationale de l'énergie (*World Energy Outlook 2007*) ont été fondées sur un prix du baril de 65 dollars (USD 2005) en 2030, alors que celles réalisées en 2001 par la même institution faisaient état d'un baril à 28 dollars en 2030.

Graphique n° 4 : Prix du pétrole (brent) et du gaz et taux de change dollar/euro¹



Source : Observatoire de l'énergie avril 2008

Cette hausse du prix du pétrole et celle, corrélée bien que décalée, du prix du gaz² s'expliquent de façon prépondérante :

- par une hausse soutenue de la demande mondiale, principalement liée à la croissance rapide des économies émergentes d'Asie³, qui n'est pas suivie par des investissements à

(1) Cours du Brent en dollar (courant), cours du gaz spot à un mois à la bourse NBP (National Balancing Point, Londres) en \$/MBtu et taux de change du dollar en euro, en moyennes mensuelles de janvier 1980 à janvier 2008.

(2) Pour le gaz, la France s'approvisionne principalement par le biais de contrats à long terme (15 à 25 ans) passés avec des entreprises de pays producteurs européens ou voisins (Gazprom, Sonatrach, Statoil, GasTerra, etc.). Dans ce cadre, les prix du gaz sont indexés principalement sur ceux des produits pétroliers, avec un retard moyen de l'ordre de six mois. En complément de ces achats, la France s'approvisionne également sur les marchés « spot », marchés de gros britannique (NBP) et de Zeebrugge, qui sont particulièrement volatils.

(3) Entre 2000 et 2005, les consommations de pétrole ont augmenté en moyenne de 4,8 % par an en Chine et en Inde, contre + 1,6 % à l'échelle mondiale. Au cours des deux prochaines décennies, la demande de pétrole brut continuera à s'accroître à un rythme soutenu en Chine et en Inde (+ 3,7 % par

due proportion dans l'amont pétrolier, ni satisfaite par la production retrouvée en Irak¹. Dans ce contexte, le moindre événement géopolitique menaçant d'amputer l'offre à court terme est de nature à provoquer des hausses de prix très vives sur les marchés pétroliers ;

- par une érosion persistante du dollar face à l'euro² et au yen qui a pu inciter les investisseurs à se « réfugier » sur les marchés des matières premières, d'autant que la crise financière, depuis l'été 2007, tend à les détourner des marchés boursiers.

Les projections que l'on peut faire du prix du pétrole dépendent à la fois de l'appréciation des fondamentaux physiques – rente de rareté compte tenu des anticipations sur l'épuisement des ressources (*peak oil*) – du prix de revient des technologies de substitution et de la réalité des pouvoirs de marché, compte tenu de la concentration des capacités de production, ou des conséquences de la financiarisation accrue de l'actif pétrolier et de l'afflux de liquidités sur les contrats pétroliers.

3.2. Le renchérissement du charbon

Au même titre que les autres matières premières, les cours du charbon sont en forte hausse depuis 2003 comme le montre le graphique n° 5. De janvier à décembre 2007, le prix du charbon vapeur³ a quasiment doublé, passant de 67 dollars par tonne (51 euros) CAF⁴ à 131 dollars par tonne (90 euros). En moyenne sur 2007, le prix spot du charbon vapeur affiche 87 dollars par tonne, soit un bond de 37 % sur un an, après + 3,2 % en 2006⁵.

Cette flambée des prix du charbon s'explique principalement par une forte demande mondiale. En effet, entre 2001 et 2006, la consommation de charbon a affiché un taux de croissance annuel moyen d'environ + 6 %, soit deux fois l'évolution de la demande de gaz ainsi que celle de pétrole.

an entre 2005 et 2030, contre + 0,5 % dans l'OCDE et + 1,3 % au plan mondial). Les deux géants asiatiques absorberont plus de 40 % de l'augmentation de la demande mondiale de pétrole d'ici à 2030, date à laquelle les deux pays représenteront 20,3 % de la consommation mondiale, contre 11,4 % aujourd'hui.

(1) L'offre de pétrole a pu suivre approximativement au même rythme que la demande sur la période 2000-2006 (+ 1,7 % par an), mais les capacités excédentaires rapidement mobilisables, qui révèlent les tensions réelles et/ou perçues entre la demande et le volume de production potentiel à chaque instant, sont inférieures (2 à 3 Mb/jour) à ce qui est habituellement considéré comme nécessaire pour faire face à une rupture temporaire d'approvisionnement chez un producteur (seuil de 4 %).

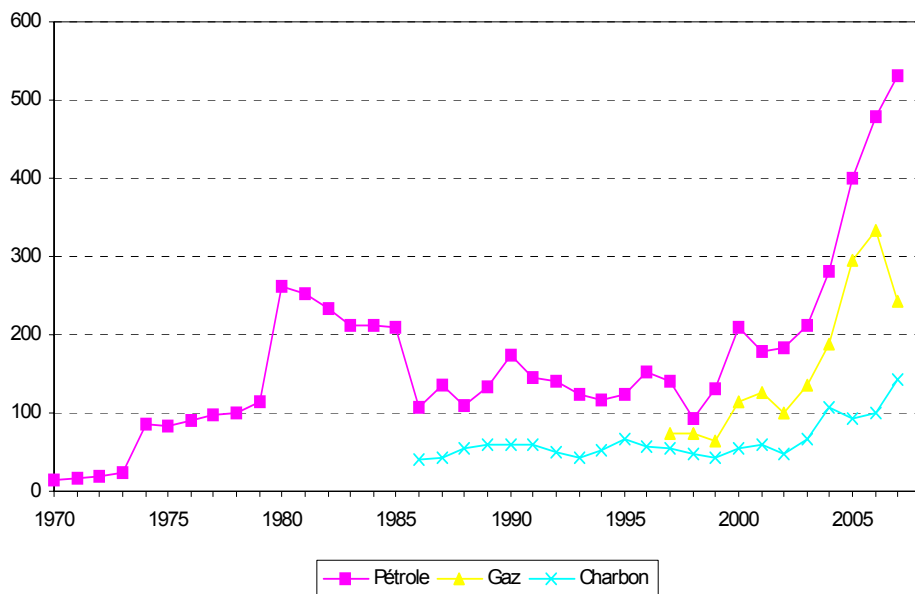
(2) La baisse du cours du dollar efface presque la hausse en dollar du prix moyen annuel du brut importé : exprimé en euro, celui-ci ne croît sur la période 2006-2007 que de 1,0 %, contre + 10 % exprimé en dollar.

(3) Sur le marché ARA (Anvers, Rotterdam, Amsterdam).

(4) CAF : coût, assurance et fret.

(5) Mesurée en euro, cette hausse est atténuée du fait de l'appréciation de la monnaie européenne durant cette période : 63 €/t CAF, soit, malgré tout, un bond de 25 %, après + 2,5 % en 2006).

**Graphique n° 5 : L'évolution du prix des différentes énergies fossiles
(dollars courants/tep)**



Source : Observatoire de l'Energie

Les seules dynamiques à l'œuvre sur les marchés énergétiques (accroissement très significatif du prix hors taxes du pétrole et du gaz) incitent à la modération des consommations mais peuvent aussi entraîner des effets de substitution entre sources d'énergie à travers un recours accru au charbon, dont l'intensité carbone est plus élevée que le gaz et le pétrole. À cet effet s'ajoute dans le secteur électrique l'effet de rendement – inférieur pour les centrales à charbon – qui débouche sur un kWh représentant environ 800 gCO₂ dans une centrale à charbon contre 400 gCO₂ pour un kWh produit par un cycle combiné à gaz.

Dans ce contexte, la commission, on le verra plus loin, s'est attachée à articuler la trajectoire du prix du carbone avec l'évolution du prix des énergies fossiles et du système énergétique, ainsi qu'avec la façon dont la rente reflétant la limitation des émissions de CO₂ sera partagée entre les pays producteurs et les pays consommateurs d'énergies fossiles au sens large, pour chacun des marchés concernés (gaz, charbon, pétrole).

4. L'émergence des marchés du carbone

À la date de publication du référentiel « Boiteux », le prix du carbone était avant tout un prix fictif et une construction intellectuelle, sans enracinement dans le monde réel. Aucun retour d'expérience ne permettait d'en tester *ex ante* la robustesse.

4.1. La mise en place d'un marché européen de quotas de CO₂

Afin d'anticiper le système international d'échange de permis d'émission de gaz à effet de serre prévu par Kyoto¹ en 2008, l'Europe a choisi de mettre en œuvre, à partir du premier

(1) Le protocole de Kyoto prévoit trois mécanismes de flexibilité afin d'aider les pays industrialisés à atteindre leurs objectifs de réduction de leurs émissions de GES au moindre coût :

- l'échange de permis d'émission négociables : le marché des permis est alimenté par les pays industrialisés ayant fait mieux que leur objectif de réduction et disposant ainsi de droits d'émission en

janvier 2005, un système européen d'échange de quotas¹ qui attribue aux principaux émetteurs des secteurs de l'industrie et de l'énergie des allocations initiales d'émission de gaz à effet de serre.

Depuis la mise en place en 2005 par l'Union européenne du plus grand marché de quotas de CO₂ existant à ce jour, le carbone est devenu, non sans difficultés, une réalité économique qui affecte les choix de production et les décisions d'investissement de 12 000 établissements des secteurs de l'industrie et de l'énergie. Le prix du CO₂ sur le marché européen des quotas (marché ETS) est aujourd'hui le prix de référence au plan international². Il est utilisé par les industriels européens mais aussi par tous les développeurs de projets dans le monde qui souhaitent valoriser leur réduction d'émission *via* les mécanismes de projet du protocole de Kyoto :

- son champ d'application concerne environ 40 % des émissions totales de gaz à effet de serre de l'UE et plus de 45 % des émissions de CO₂ ;
- le dispositif a effectivement produit ce que l'on attendait d'un marché « environnemental » : une infrastructure performante (systèmes de registres interconnectés de transactions, surveillance et contrôle des émissions effectives), des prix (au comptant et à terme, pour différentes maturités), une profondeur d'échanges (262 millions de tonnes en 2005, 809 millions de tonnes en 2006, 1,5 milliard de tonnes en 2007), un effort d'abattement réel estimé entre 50 et 100 millions de tonnes par an en 2005 et 2006³ ;
- le marché européen s'est imposé comme le noyau de la finance carbone internationale en s'interconnectant avec succès aux mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto (mécanisme de développement propre – MDP, mise en œuvre conjointe – MOC), dont le prix des crédits (respectivement URCE⁴ et URE) est corrélé à celui du quota ;

excès. La mise en œuvre du protocole de Kyoto en 2008 implique la distribution à chaque État de l'Annexe B (pays industrialisés) des unités de quantité attribuée (UQA) correspondant à son niveau de plafonnement des émissions. Ces UQA sont librement échangeables sur le marché international entre États. En fin de période, chaque État devra restituer autant d'unités qu'il aura émises de gaz à effet de serre entre 2008 et 2012 ;

- la mise en œuvre conjointe (MOC) : permet à un pays industrialisé de se voir crédité des réductions d'émissions obtenues grâce à un investissement, réalisé par ses entreprises, dans un autre pays industrialisé. Ce mécanisme concerne principalement les pays d'Europe centrale et orientale, la Russie et l'Ukraine ;
- le mécanisme de développement propre (MDP) : suit le même principe que la mise en œuvre conjointe, mais cette fois entre un pays industrialisé et un pays en développement.

(1) Voir sur ce point un premier bilan de cette expérience dans De Perthuis, Convery et Ellerman (2008).

(2) Sur le marché européen d'échange de quotas de CO₂ (EU ETS), les installations « sous quotas » doivent restituer des quotas à hauteur des émissions de CO₂ de l'année précédente pour être en conformité avec la Directive quotas. Le prix du quota (1 quota = 1 tonne de CO₂) émerge de la rencontre de l'offre et de la demande. L'offre se compose du plafond d'allocation initial de quotas aux installations émettrices de CO₂ pour une période et de la quantité pour la phase II (2008-2012) de crédits Kyoto utilisables. La demande dépend de l'ensemble des facteurs de hausse ou de baisse des émissions de CO₂. L'évolution des prix s'est également montrée très sensible aux annonces institutionnelles concernant le périmètre et les modalités des échanges de quotas (Commission européenne).

(3) Ellerman et Buchner (2008).

(4) Les URE ou unités de réduction des émissions (ERUs en anglais) sont les crédits attribués pour des réductions d'émissions réalisées dans le cadre du mécanisme de mise en œuvre conjointe (MOC). Les URCE ou unités de réduction certifiée des émissions (CREs en anglais) sont les crédits attribués pour des réductions d'émissions réalisées dans le cadre du mécanisme de développement propre (MDP). Chaque URE et URCE équivaut à une tonne d'équivalent de CO₂.

- le marché européen est désormais prêt à accueillir de nouvelles activités (le transport aérien dès 2011¹, le captage et le stockage du CO₂, etc.), de nouveaux gaz à effet de serre (par exemple les perfluorocarbures issus de la production d'aluminium), et à bénéficier de nombreuses améliorations après 2012 (allongement de la durée des périodes, basculement vers les enchères comme mode d'allocation de droit commun, prise en compte des risques de « fuites de carbone », etc.) qui devraient répondre aux difficultés rencontrées lors de la période 2005-2007 ;
- entre 2005 et 2007, le prix annuel moyen du quota au comptant est passé de 22,79 euros à 0,66 centimes d'euro la tonne, conséquence du surplus de quotas sur les émissions réelles vérifiées et surtout de l'absence de possibilité de report (*banking*) des quotas non utilisés d'une période à l'autre. Sur la même période, il était déjà possible de négocier des contrats à terme pour livraison entre 2008 et 2012 (phase II du marché) à 21,50 euros la tonne en moyenne. La deuxième phase a fait l'objet d'une allocation de quotas moins généreuse qu'entre 2005 et 2007, ce qui explique ce différentiel de prix.

Tableau n° 6 : Les prix annuels moyens de la tonne de CO₂ sur le marché européen

	2005	2006	2007
Quota au comptant (<i>spot</i>) - pour la phase I (2005-2007)	22,79 €	17,64 €	0,66 €
Contrats à terme (<i>futures</i>) – phase II (2008-2012)			
- livraison fin 2008	21,78 €	20,49 €	19,57 €
- livraison fin 2012	22,26 €	22,60 €	21,65 €

Source : Mission Climat de la Caisse des dépôts

Les derniers prix de marché (fin avril 2008) montrent :

- une tendance de prix à la hausse sur la phase II (2008-2012) : 28,50 euros la tonne pour livraison à fin 2012 (+ 31 % par rapport à fin janvier 2008) ;
- les premières cotations pour des contrats de la phase III (2013-2020) qui suivent la tendance de prix de la phase II (2008-2012) sans réelle rupture : 31 euros la tonne à fin 2014.

Les prévisions à plus long terme des analystes montrent une tendance à la hausse à l'horizon 2020 (cf. tableau n° 7).

(1) La Commission européenne a proposé de modifier la directive 2003/87/CE établissant le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre pour y intégrer les activités aériennes. Le Parlement puis le Conseil des ministres ayant approuvé la modification dans des termes légèrement différents, une seconde lecture par le Parlement est en cours. L'intégration dans le système d'échange du transport aérien intérieur à l'Union s'effectuera d'abord à partir de 2011, puis celui des vols internationaux à partir de 2012.

Tableau n° 7 : Prévisions du prix du CO₂ sur le marché ETS
(en euros par tonne)

	2012	2020
Commission européenne		39,00
Fortis	37,50	
Société générale	35,00	
Deutsche Bank	35,00	
UBS	32,50	
ICF	32,50	45,00

Source : Caisse des dépôts, Mission Climat

4.2. Prix de marché et valeur tutélaire du carbone

Les marchés du carbone vont constituer dans les décennies qui viennent un élément décisif de la lutte contre le changement climatique :

- les prix sur ces marchés révèlent le coût associé à la contrainte qu'on fait supporter au système économique, compte tenu du degré de liberté laissé aux acteurs pour gérer cette contrainte. Ils révèlent que les coûts marginaux observés *ex post* dans le système industriel diffèrent souvent de ceux estimés *ex ante* par les experts ;
- ces marchés donnent de nombreuses informations utiles sur les déterminants de la valeur du carbone : les températures, les précipitations, les prix de l'énergie, les perspectives de croissance économique et de production industrielle, etc. ;
- ces éléments d'information seront de plus en plus précis au fur et à mesure que le marché européen couvrira un champ plus large et qu'il s'interconnectera avec les autres marchés du carbone pour former un véritable marché mondial.

La question se pose de savoir si, à terme, les signaux qui pourraient être envoyés par des marchés plus matures, interconnectés, avec des règles du jeu stables et contrôlées, seraient suffisants pour définir un référentiel carbone utile pour la collectivité :

- d'un côté, il existe un lien direct entre les objectifs de réduction affichés par la collectivité et les quotas alloués. On peut donc considérer que la valeur tutélaire de la collectivité devrait tendre à se confondre avec le prix de marché. Le marché réagit bien aux contraintes quantitatives décidées par la collectivité et détermine un prix qui s'impose aux acteurs privés comme aux acteurs publics ;
- de l'autre, les prix de marchés résultent des anticipations des agents dont les calculs et l'horizon peuvent ne pas prendre en compte l'ensemble des données importantes qui président à l'orientation à long terme des décisions structurantes des pouvoirs publics en termes d'investissement.

Dans l'immédiat, le marché reste encore trop limité pour donner une vision globale des contraintes que font peser les objectifs de réductions : les secteurs dans lesquels le coût d'abattement du carbone est important restent globalement hors ETS ; l'horizon temporel sur lequel le marché fonctionne est encore trop court, même si on observe des ventes de contrats allant sur des périodes au-delà de 2012. Il revient donc à l'État de fixer, en concertation avec les représentants de la société civile, une valeur tutélaire du carbone, même si cette valeur ne peut pas ignorer les signaux envoyés par le marché.

Conclusion

Ce chapitre vient de passer rapidement en revue le cadre dans lequel la commission doit élaborer un référentiel carbone. Le contexte international a en effet beaucoup évolué depuis 2001 et quelques éléments importants méritent d'être intégrés à la réévaluation de la valeur du carbone :

- la connaissance autour de l'effet de serre et du réchauffement climatique a fait de grands progrès, et les enjeux économiques associés aux coûts de l'action et de l'inaction sont maintenant clairement posés ;
- la dynamique internationale autour du changement climatique se renforce mais continue de se heurter à de nombreuses difficultés qui ne permettent pas d'avoir une vision claire des engagements institutionnels à moyen-long terme ;
- l'émergence des marchés du carbone apporte un supplément d'informations pour déterminer, du moins sur un horizon court, la valeur de référence du carbone ;
- les attentes par rapport à un référentiel carbone se sont renforcées, comme en témoignent le « Grenelle de l'environnement » et les travaux conduits au niveau international sur la valeur du carbone, que le chapitre suivant passe en revue.

Chapitre 3

Les différentes approches de la valeur du carbone

Dans la littérature économique comme dans les débats publics, on voit apparaître un grand nombre de valeurs du carbone (ou du CO₂). Ces références reposent sur des concepts théoriques, des espaces géographiques et des méthodes de calcul différents. La terminologie varie en conséquence : coût social du carbone, coût de réduction ou d'abattement des émissions, prix fictif, valeur économique ou valeur tutélaire du carbone.

La présentation qui suit passe en revue les différentes approches possibles :

- la première est fondée sur l'analyse coûts/avantages. La valeur du carbone est associée aux coûts des dommages occasionnés par l'effet de serre ; on parle alors de coût social des dommages ;
- la deuxième est fondée sur une approche coûts/efficacité. La valeur du carbone correspond au coût de réduction des émissions nécessaire pour atteindre un objectif de réduction des émissions ; on parle alors de coût d'abattement des émissions ;
- enfin la troisième approche consiste à considérer les valeurs révélées par le marché ETS, qui sont fondamentalement des anticipations sur l'avenir du protocole de Kyoto et sur la façon dont l'Union européenne traduira ses engagements de réduction d'émissions dans les secteurs de l'énergie et de l'industrie. On a vu, dans le chapitre précédent, l'intérêt et les limites de cette approche.

Ces différentes approches sont adoptées par des études scientifiques, ainsi que par des exercices plus institutionnels, tels le rapport Stern ou celui de notre commission.

1. Les références pour définir la valeur du carbone¹

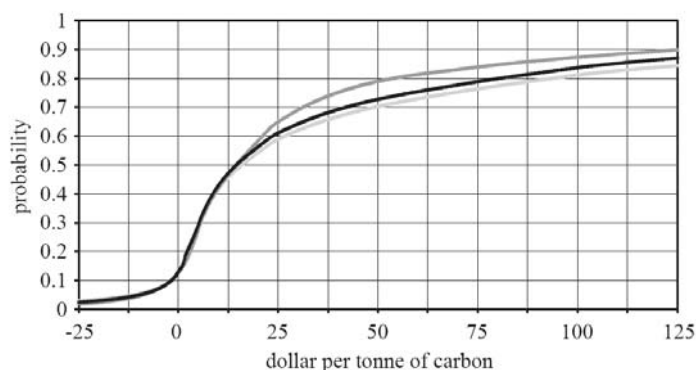
1.1. Le coût social des dommages et l'analyse coûts/avantages

Une première manière d'aborder la valeur carbone consiste à évaluer le coût des dommages associé au changement climatique. Ce type d'approche relève de ce qu'on appelle l'analyse coûts/avantages : la valeur de la tonne de carbone se mesure au regard de l'impact que l'émission de cette molécule supplémentaire aura sur le bien-être des générations futures. On associe donc à une tonne émise de CO₂ aujourd'hui la valeur actuelle d'un dommage futur que l'on cherche à évaluer.

(1) Les éléments présentés ici sont analysés plus en détail dans un travail de réflexion prospective d'un groupe de travail présidé par Roger Guesnerie, « La collectivité face à la valeur sociale du carbone : Vers la nécessaire construction d'un référentiel partagé », 2007, Centre d'analyse stratégique (Baumstark et Guesnerie, 2007).

La revue de la littérature, comme celle proposée par Tol (2005)¹, montre la dispersion des valeurs obtenues dans l'approche coûts/avantages, même si elles ne sont généralement pas comparables et même s'il est toujours difficile de résumer des études, des recherches à des valeurs particulières², alors qu'elles proposent des fourchettes ou sont associées à différentes hypothèses.

Graphique n° 6 : Répartition des différentes valeurs des coûts des dommages dans la littérature économique (dollar par tonne de carbone)



Source : Tol (2005)³

La médiane de ces valeurs⁴ est proche de 3 dollars par tonne de CO₂, la moyenne est de l'ordre de 5 dollars. Les plus hautes dépassent 20 dollars par tonne de CO₂ mais ne représentent que 5 % de l'échantillon.

De manière générale, ces valeurs doivent être considérées avec prudence, dans la mesure où ne sont envisagés dans ces modèles que les effets les mieux compris et les plus facilement mesurables. Par ailleurs, les effets mesurés adviendront dans un futur éloigné et ont tendance à être minorés par le processus d'actualisation retenu. Enfin, la mesure des dommages apparaît difficile, en raison d'obstacles méthodologiques et éthiques délicats : comment appréhender, par exemple, le coût d'une migration importante, celui de la disparition de zones urbaines côtières, ou encore la valeur statistique de la vie humaine dans une approche internationale ? Ces questions sont compliquées par le fait qu'il est difficile de compenser ces coûts par les avantages que certaines zones pourraient au contraire retirer de l'augmentation de la température.

Néanmoins, le fort intérêt suscité par le rapport Stern montre que cette approche coûts/avantages est utile à plusieurs titres :

- elle offre un ordre de grandeur des enjeux et des efforts à mettre en œuvre ;
- elle intéresse les assureurs qui cherchent à déterminer le coût des dommages potentiels que pourraient subir leurs assurés (catastrophes naturelles, pandémies, etc.). De fait, le

(1) De nombreuses synthèses existent sur le coût social du carbone : voir Pearce (2003), Watkiss (2005), et plus récemment le Rapport Stern.

(2) Les rares études économiques publiées sur le coût global du changement climatique avançaient des chiffres de 1 % à 2 % de pertes (Nordhaus, 2006), Tol (2002a, b) ou Mendelsohn *et al.* (2004), soit une fourchette de valeurs dont la modestie ne manquait pas de surprendre les non-économistes. Le rapport Stern (voir plus bas) propose des chiffres beaucoup plus importants.

(3) "The marginal Damages costs of Carbon dioxide emissions : an assessment of the uncertainties", *Energy Policy* (33) 2005.

(4) À cette époque, l'euro valait entre 1,1 et 1,2 dollar.

marché commence par ce biais à internaliser un certain nombre d'effets du changement climatique.

- elle a vocation à servir de base à l'évaluation des objectifs quantifiés de réduction des émissions que la France et l'Europe se sont récemment fixés pour les décennies à venir.

En revanche, cette approche doit être utilisée avec précaution lorsqu'on veut fixer le bon niveau d'incitations dans l'économie. On remarquera en effet que la valeur sociale du carbone (des dommages) est d'autant plus faible qu'on se fixe un objectif de réduction des émissions élevé : les dommages seront moins importants si la concentration est à 450 ppme que si elle est à 550 ppme. Dans le rapport Stern, par exemple, le coût social du carbone dans un scénario *Business as Usual* est estimé à 85 dollars par tonne de CO₂; dans le cas d'un objectif de stabilisation à 450 ppme, le coût social du carbone ne serait plus que de 25 dollars par tonne de CO₂ (30 dollars pour une stabilisation à 550 ppme).

**Tableau n° 8 : Synthèse de différentes valeurs
du coût social des dommages
(€/tCO₂)**

Source	Année de référence	Coûts des dommages (€/tCO ₂)			Commentaires
		Min.	Central	Max.	
ExterneE 2005	2010		9		
Watkiss 2005	2000	14	22	87	Étude fondée sur le seul coût des dommages
	2010	17	27	107	
	2020	20	32	138	
	2030	25	39	144	
	2040	28	44	162	
	2050	36	57	198	
Watkiss 2005	2000	14	22	51	Étude fondée sur une comparaison des coûts des dommages et des coûts d'évitement
	2010	16	26	63	
	2020	20	32	81	
	2030	26	40	103	
	2040	36	55	131	
	2050	51	83	166	
Tol 2005		- 4	11	53	Basée sur des études avec un taux actualisation à 1%
Stern 2006	2050		71		Scénario au fil de l'eau
	2050		25		Stabilisation 550
	2050		21		Stabilisation 450
DLR 2006		15	70	280	Étude basée sur Downing 2005

Source : *Handbook on Estimation of External Cost in the Transport Sector, DELFT Impact, 2007, p. 262*

1.2. Le coût d'abattement des émissions de CO₂

Une autre manière d'appréhender la valeur économique de la tonne de CO₂ consiste non plus à considérer le dommage associé aux émissions, mais le coût qu'il faut consentir pour les réduire à un niveau donné. On parle alors de coûts d'abattement du CO₂. Plus la contrainte sur

les émissions fixée par la puissance publique est forte, plus la valeur de la tonne de carbone associée à cet effort est élevée, car il faut alors mobiliser des potentiels de réduction plus importants. Plus on impose aux agents économiques des conditions restrictives pour effectuer ces efforts (cloisonnement des marchés sectoriels par exemple, en imposant des réductions spécifiques à chaque secteur : transport, habitat, énergie, etc.) plus la valeur carbone associée à cet effort augmente.

Dans ce type de calcul, la valeur de la tonne de carbone ne dépend pas de l'effet qu'elle aura sur le changement climatique mais du niveau de contrainte sur les émissions et des mécanismes de flexibilité associés pour les réduire.

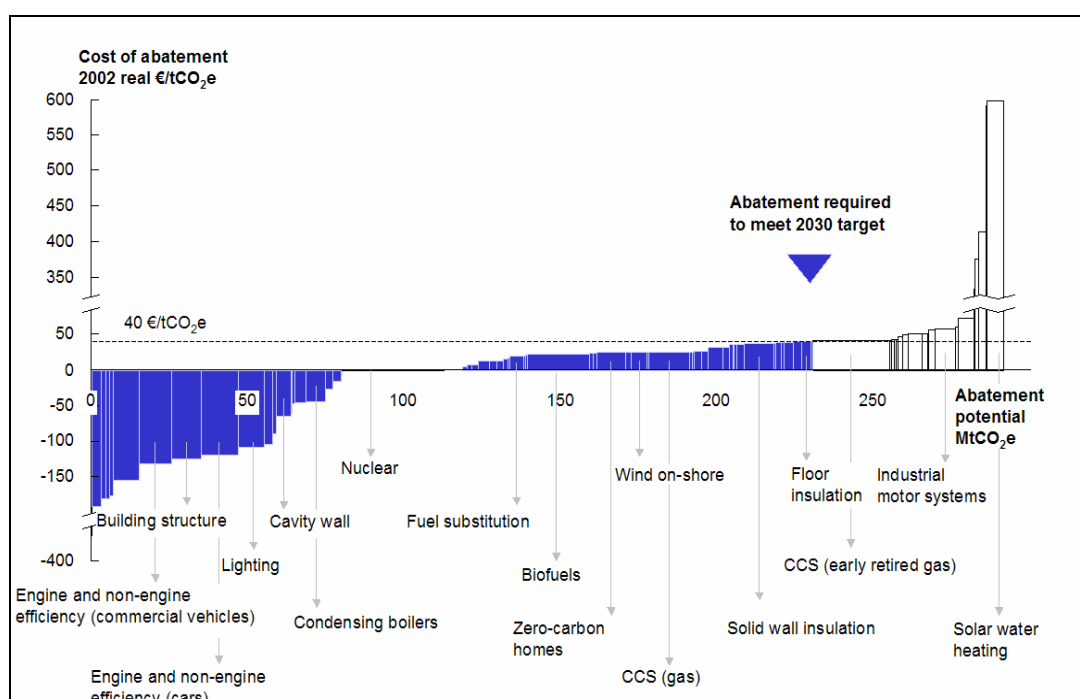
1.2.1. Les analyses sur la base des coûts d'abattement sectoriels

L'efficacité économique et sociale recommande :

- que l'on mobilise en priorité les procédés d'abattement les moins coûteux ;
- que la valeur du carbone retenue comme référentiel corresponde finalement au coût du dernier procédé utilisé pour satisfaire le niveau d'émissions autorisé.

C'est bien cette valeur qui importe à la collectivité et qui pourrait constituer pour l'ensemble des acteurs le signal à donner, invitant à réaliser tous les efforts dont le coût est inférieur à cette norme. C'est ce type de démarches qu'on trouve illustré par exemple dans le graphique n° 7.

Graphique n° 7 : Courbes de coût d'abattement (Royaume-Uni)



Source : McKinsey, UK cost curve; team analysis

L'existence de coûts d'abattement sectoriels négatifs signifie que ces coûts « technico-économiques » ne prennent pas en compte tous les coûts d'abattement : coûts d'information, de transaction, dans la relation bailleurs-locataires notamment, difficultés d'accès au crédit, etc.

1.2.2. Les modèles à la recherche d'un coût d'abattement global

On peut utiliser des modèles économiques qui synthétisent l'ensemble du système économique d'un pays et calculer une valeur du carbone cohérente avec un niveau des émissions à ne pas dépasser. Dans cette optique, les valeurs produites par les modèles traduisent le signal-prix qu'une économie doit « suivre » pour atteindre un objectif donné de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre. On parle de la valeur duale de la contrainte. Le résultat est fonction de la structure du modèle et des hypothèses générales retenues dans les simulations (sur la croissance, sur l'émergence de nouvelles technologies, sur la réponse des agents économiques aux prix des matières premières, etc.).

L'utilisation des modèles présente un triple intérêt :

- ils permettent d'exploiter les projections disponibles au niveau international sur les évolutions démographiques, la croissance des économies et les évolutions du secteur énergétique ;
- ils sont bien adaptés à l'approche coûts/efficacité car ils permettent de déduire des contraintes qu'on fait porter sur les émissions la valeur du carbone qui leur est associée. Le couplage entre les modèles économiques et climatiques les rend par ailleurs de plus en plus efficaces ;
- enfin, la confrontation des modèles permet de faire ressortir le rôle essentiel joué dans les simulations par le progrès technique.

Tableau n° 9 : Synthèse de différentes valeurs de coûts d'abattement
(€/tCO₂)

Source	Année de référence	Coûts d'évitement (€/t CO ₂)			
		Min.	Central	Max.	Référence coûts
Recordit 2000	2010		37		Objectif Kyoto
	2050		135		Objectif IPCC 50 %
Capros, Mantzos 2000	2010	5		38	Objectif Kyoto Avec ou sans échange entre l'UE et le reste du monde
UNITE 2003	2010		20		Basée sur Capros Basée sur Mantzos 2000
INFRAS 2004	2010		20		Objectif Kyoto
	2050		140		Objectif IPCC 50 %
ExterneE 2005	2010	5	19	20	Objectif Kyoto
	2050		95		Stabilisation à + 2° C
Stern 2006	2015	32	49	65	Coût d'abattement moyen
	2025	16	27	45	
	2050	- 41	18	81	
SEC 2007	2010		14		Stabilisation à + 2° C
	2020		38		
	2030		64		
	2040		120		

Source : Handbook (2007)⁽¹⁾

(1) On Estimation of External Cost in the Transport Sector, DELFT Impact, 2007 p. 262.

2. Les exercices institutionnels de détermination d'une valeur tutélaire du carbone

2.1. Le précédent exercice de la commission Boiteux

En 2001, le groupe de travail du Commissariat général du Plan chargé de préciser les valeurs environnementales à intégrer dans les évaluations socioéconomiques des infrastructures de transport avait proposé :

- de retenir une valeur tutélaire de 27 euros la tonne de CO₂ sur la période 2000-2010 (exprimée en euros 2000) ;
- de faire croître cette valeur, après 2010, au taux de 3 % par an¹.

Cette chronique ne résultait pas d'un modèle particulier mais d'un compromis essayant d'intégrer un ensemble d'arguments et de propositions défendus par des acteurs aux analyses voire aux intérêts différents. Elle reflétait un scénario dans lequel le monde était supposé recourir aux mécanismes de flexibilité (participation effective d'un plus grand nombre de pays, extension du système de permis d'émissions négociables, mécanismes de développement propre) et continuait à exploiter l'énergie nucléaire.

Tableau n° 10 : Le référentiel défini en 2001 par le rapport Boiteux
(en euros 2000)

	2000-2010	2010-2020	Après 2020
Valeur carbone (€/tCO ₂)	27,3 €/tCO ₂	+ 3 %/an	+ 3 %/an
Prix du pétrole HT (\$/baril)	24 \$ + 1,4 %/an	+ 1,4 %/an	+ 2 %/an

Source : Rapport Boiteux (2001)

La règle d'évolution à 3 % était par ailleurs sensiblement inférieure au taux d'actualisation public de l'époque, soit 8 %, ce qui avait pour effet d'écraser dans le temps la valeur de la tonne de carbone. Cette règle est le fruit d'un compromis entre ceux qui faisaient preuve de scepticisme sur la coopération internationale et plaidaient pour un taux de croissance de la valeur carbone plus élevé (5 % par an), et ceux, plus nombreux, qui, exprimant leur confiance dans les mécanismes de coopération et le progrès technique, plaidaient pour un taux plus faible (2 % par an).

2.2. Les valeurs du GIEC

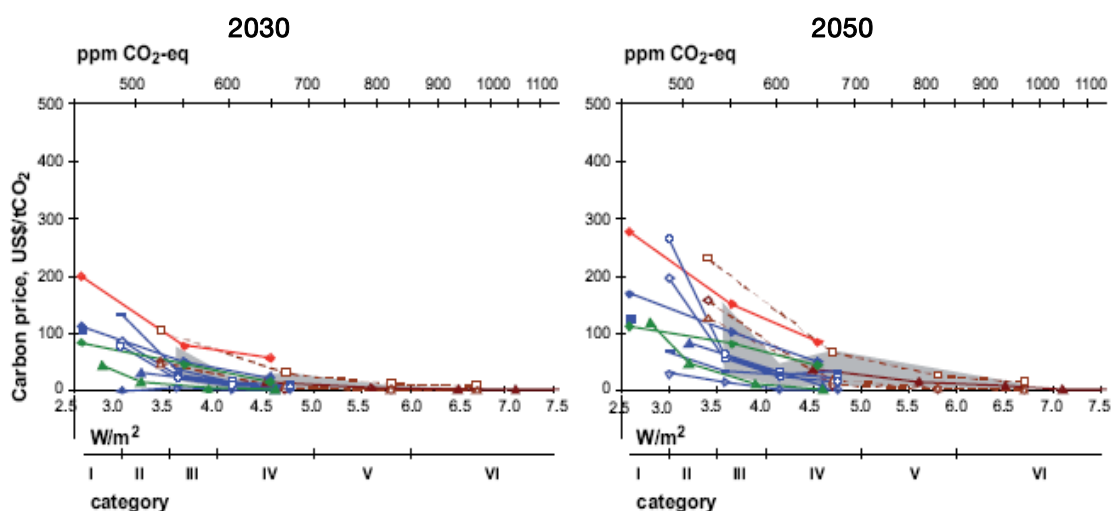
Le dernier rapport du groupe 3 du GIEC a analysé les résultats obtenus par les principales études publiées sur une période de cinq ans, dont les graphiques n° 8 donnent une synthèse.

Le rapport du GIEC conclut que les valeurs sont toujours croissantes dans le temps et s'établissent :

(1) Notons qu'en 2050, selon les règles d'évolution définies dans ce même rapport, les valeurs du carbone et du pétrole seraient respectivement de l'ordre de 104 euros la tonne de CO₂ et de 54 dollars le baril.

- pour 2030, entre 18 et 85 dollars par tonne de CO₂ pour un scénario de stabilisation des concentrations à 550 ppme ; et proche de 100 dollars par tonne pour un scénario de stabilisation à 450 ppme ;
- pour 2050, entre 30 et 155 dollars par tonne de CO₂ pour un scénario à 550 ppme et entre 100 et 300 dollars par tonne de CO₂ pour un scénario à 450 ppme.

Graphique n° 8 : Relation entre objectif de réduction et prix du carbone¹



Source : GIEC, Rapport Groupe III, chapitre 3, p. 205

2.3. Le référentiel proposé par l'administration britannique

Le Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) a proposé, fin décembre 2007², une chronique de valeurs destinée à être utilisée pour l'évaluation des investissements et des politiques au Royaume-Uni.

Le rapport explique que la valeur du carbone retenue a été définie sur la base d'un objectif de réduction cohérent avec les coûts des dommages identifiés par le rapport Stern. Cette valeur est clairement distinguée du prix observé sur les marchés du carbone qui dépendent des contraintes imposées par les pouvoirs publics sur l'offre de quotas d'émissions. La valeur proposée s'écarte également de la valeur sociale du carbone (basée sur le coût des dommages de l'effet de serre, nécessairement mondial). Le rapport justifie ce choix en expliquant que cette référence dépend de ce que font les autres pays, souffre de trop d'incertitudes et n'offre pas de garantie sur le bon niveau d'incitation. En effet, la valeur sociale du carbone (valeur des dommages) est d'autant plus faible qu'on se fixe un objectif de réduction des émissions élevé : les dommages seront moins importants si la concentration est à 450 qu'à 550 ppme.

Considérant que le rapport Stern suggère que le niveau de stabilisation des émissions se situe dans une fourchette comprise entre 450 et 550 ppme et qu'il est probable qu'une majorité de

(1) Ce tableau donne en dollar pour différentes études les montants de la valeur carbone associée à chaque niveau de concentration de gaz à effet de serre : catégorie I (450-500 ppme) à VI (+ 1 000 ppme), à deux dates (2030 et 2050).

(2) Rapport du DEFRA, *The Social Cost of Carbon and the Shadow Price of Carbon: What they are and How to Use them in Economic Appraisal in the UK*, Economics Group of DEFRA, décembre 2007 : <http://www.defra.gov.uk>.

pays s'engage dans un effort de réduction des émissions de CO₂, le rapport DEFRA retient une valeur compatible avec celle associée par le rapport Stern au niveau de concentration de 550 ppme, en précisant que ce choix n'implique en aucune manière que ce niveau de 550 ppme soit l'objectif optimal.

« It's important to note that the rationale for adopting a social cost of carbon value corresponding with the top of the stabilisation range is to ensure that abatement is generated compatible with moving into the 450-550 ppm proposed range. It does not imply acceptance of 550 ppm as a target rather than a lower stabilisation goalf ».

Ces éléments conduisent le rapport à proposer au gouvernement britannique de retenir :

- une valeur du carbone de 26 £/tCO₂ (2008)², soit 36 euros la tonne de CO₂ ;
- des tests de sensibilité autour de cette valeur de - 10 % ou + 20 %, soit une fourchette étroite dans la mesure où le risque est déjà pour partie internalisé dans le choix d'une valeur élevée. Une fourchette plus large pourrait par ailleurs entraver la décision publique ;
- un taux de croissance de la valeur de 2 % par an, pour prendre en compte l'augmentation du coût des dommages dans le temps.

Le rapport rappelle que le référentiel proposé ici pour évaluer les investissements et les politiques publiques doit s'inscrire dans le cadre des principes de calcul économique établis par le *Green Book* qui suppose une actualisation de tous les coûts et bénéfices à un taux de 3,5 %.

2.4. L'exercice de simulation de l'administration américaine

Aux États-Unis, le *Climate Change Science Programme* (mené par treize agences fédérales) a lancé un exercice de prospective autour de plusieurs scénarios d'émissions de CO₂ et du changement climatique dans l'objectif d'éclairer la décision publique. Le rapport évalue à l'aide de trois grands modèles³ les conséquences énergétiques et économiques de quatre scénarios alternatifs de stabilisation des émissions : les niveaux 1, 2, 3 et 4 correspondent respectivement aux niveaux de concentration de CO₂ de 450, 550, 650 et 750 ppm. Si l'on considère le seul niveau 1, correspondant à l'objectif 450 ppm (CO₂ seul), les valeurs ramenées en euros et par tonne de CO₂ varient en 2020 de 20 à 54 euros par tonne de CO₂ et en 2050 de 98 à 177 euros par tonne de CO₂ (sur la base d'un taux de change d'un euro pour 1,3 dollar).

On obtient les chroniques présentées dans le tableau n° 11.

(1) *Op. cit.*, p.6.

(2) Le taux de change était de 1,4 euro pour une livre sterling en décembre 2007, après avoir été pendant près d'un an à plus de 1,45. Le texte lui même donne une valeur de 40 euros pour cette même date.

(3) The Integrated Global Systems Model (IGSM) (Massachusetts Institute of Technology). The Model for Evaluating the Regional and Global Effects (MERGE) Stanford University, the Electric Power Research Institute). The MiniCAM Model (Global Change Research Institute : Pacific Northwest National Laboratory and University of Maryland).

**Tableau n° 11 : Valeur carbone à différents horizons
pour chaque scénario de stabilisation
(en dollar par tonne de carbone)**

Niveau de stabilisation	2020 (\$/tonne de carbone)			2030 (\$/tonne de carbone)		
	IGSM	merge	MiniCAM	lgsm	merge	MiniCAM
Niveau 4	18	1	1	26	2	2
Niveau 3	30	2	4	44	4	7
Niveau 2	75	8	15	112	13	26
Niveau 1	259	110	93	384	191	170

Niveau	2040 (\$/tonne de carbone)			2050 (\$/tonne de carbone)		
	IGSM	merge	MiniCAM	lgsm	merge	MiniCAM
Niveau 4	58	6	5	415	67	54
Niveau 3	97	11	19	686	127	221
Niveau 2	245	36	69	1743	466	420
Niveau 1	842	574	466	6053	609	635

Source : U.S. Climate Change Science Program

2.5. Les travaux entrepris par la Commission européenne

La Commission européenne a engagé de nombreux travaux sur la valorisation du carbone en relation avec les réflexions sur la tarification des infrastructures et l'harmonisation des procédures d'évaluation dans le secteur des transports. On notera par exemple le travail mené dans le cadre d'HEATCO¹ qui propose des valeurs du carbone en cohérence avec les engagements de limiter les émissions de CO₂ pour éviter que la température moyenne ne dépasse 2° C. Ce rapport² recommande de retenir des valeurs carbone allant de 25 euros par tonne de CO₂ en 2010 jusqu'à 83 euros par tonne de CO₂ en 2050.

**Tableau n° 12 : Valeurs recommandées pour les coûts externes
du changement climatique**

Année d'émission	Valeur centrale	Pour des analyses de sensibilité	
		Bas	Haut
2000-2009	22	14	51
2010-2019	26	16	63
2020-2029	32	20	81
2030-2039	40	26	103
2040-2049	55	36	131
2050	83	51	166

Source : HEATCO 2006

(1) Ce projet propose des lignes directrices harmonisées à l'échelle européenne pour l'évaluation des projets de transport et notamment ceux des Réseaux transeuropéens (HEATCO - Developing Harmonised European Approaches for Transport COsting and Project Assessment).

(2) Les valeurs données par année d'émission combinent les ordres de grandeurs issus de chiffreages établis sur des estimations du coût des dommages et du coût d'abattement. Le coût des dommages est estimé avec un taux d'actualisation et comprend des considérations d'équité entre les générations. Tous les effets du changement climatique ne sont pas pris en compte. Voir Watkiss, 2005.

La Commission européenne vient plus récemment de publier une étude réalisée par plusieurs instituts de recherche, pour le compte de la DG TREN : *Handbook on Estimation of External Cost in Transport Sector*¹. Cette étude s'inscrit dans la dynamique impulsée par le Livre vert de mars 2007² sur les instruments économiques dans la politique énergétique et climatique. Elle propose un état de l'art sur l'évaluation des coûts externes et constitue le socle sur lequel la Commission européenne prépare une communication devant préciser la stratégie qu'elle compte suivre pour l'internalisation des coûts externes dans tous les modes de transport. À cette occasion, elle aborde précisément la valeur de la tonne de carbone³ à prendre en compte.

Le rapport propose ainsi de distinguer deux périodes :

- à court terme (2010-2020), il convient de s'appuyer sur les valeurs construites sur le coût d'abattement associé à l'objectif européen ;
- à plus long terme (2030-2050), l'incertitude sur les objectifs internationaux reste entière et il est préférable de s'appuyer sur une approche fondée sur le coût social des dommages.

Cette position conduit le rapport à proposer un tableau de valeurs de référence pour différents horizons temporels. Ces valeurs se situent entre le scénario bas ou haut dans un rapport de 1 à 7 à court terme et de 1 à 9 en 2050. On retiendra la valeur centrale en 2050 de 85 euros par tonne de CO₂.

Tableau n° 13 : Valeurs recommandées pour les coûts externes du changement climatique

Année de référence	Valeurs centrales (€/tonne de CO ₂)		
	Bas	Valeur centrale	Haut
2010	7	25	45
2020	17	40	70
2030	22	55	100
2040	22	70	135
2050	20	85	180

Source : *Handbook, DELFT IMPACT 2007*

En conclusion, les discussions actuelles au sein de la Commission européenne restent ouvertes. Même si ces travaux préliminaires ne l'engagent pas, la Commission considère que les valeurs proposées, notamment jusqu'en 2020, sont assez robustes et qu'il reste préférable de ne pas retenir à court terme les chiffrages basés sur le coût social du carbone qui semblent moins consensuels. Il se dégage un certain consensus pour dire que la valeur carbone hors ETS sur l'ensemble de l'Europe devrait être comprise en 2050 dans la fourchette de ce tableau.

(1) *Handbook on Estimation of External Cost in Transport Sector*, (produced within the study : Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport, IMPACT Authors : Maibach M., Schreyer C., Sutter D. (INFRAS) ; Van Essen H. P., Boon B. H., Smokers R., Schroten (CE Delft) ; Doll C. (Fraunhofer Gesellschaft – ISI) ; Pawlowska B., Bak M. (University of Gdansk)), DELFT, décembre 2007.

(2) Voir aussi : COM (2007) 2 ; {SEC (2007) 7-8} « Limiter le réchauffement de la planète à 2 degrés Celsius. Route à suivre à l'horizon 2020 et au-delà », *Package of Implementation Measures for the EU's Objectives on Climate Change and Renewable Energy for 2020* {SEC (2008) 85 ; COM (2008) 17}

(3) La réflexion s'appuie sur les derniers travaux synthétiques disponibles : Watkiss (2005), Tol (2005), Downing *et al.* (2005), ExterneE (2005), DLR (2006) et STERN Review (2006).

La Commission européenne considère que ce référentiel doit être unique même si les objectifs de réductions par pays sont modulés sur la base du PIB par tête. La valeur implicite du carbone n'est sans doute pas la même entre les pays. Cependant, le marché ETS compte tenu de son importance va accélérer le processus de convergence et faire en sorte d'égaliser les coûts marginaux d'abattement.

2.6. Synthèse

Il est intéressant de comparer les principaux référentiels construits par d'autres administrations, compte tenu de la proximité de leur démarche avec celle entreprise ici. Tout en restant prudent sur de tels rapprochements, on observera qu'en moyenne, pour le même objectif de 450 ppme, les valeurs du carbone se situent dans une fourchette comprise entre 20 et 50 euros la tonne de CO₂ en 2020, et entre 85 et 180 en 2050. Toutes les administrations retiennent une valeur croissante dans le temps, à un taux compris entre 2 % et 5 %, et que ce taux est en général plus faible que le taux d'actualisation.

Le tableau n° 14 résume les principales valeurs, exprimées en euros, en précisant l'objectif de concentration envisagé, la croissance de la valeur carbone dans le temps ainsi que le taux d'actualisation de référence affiché pour les évaluations d'investissements publics.

**Tableau n° 14 : Synthèse des valeurs du carbone
élaborées par les institutions officielles
(en euros 2008)**

	France (Boiteux II)	Royaume-Uni (DEFRA)	Union européenne (a)	États-Unis (b)		
				IGSM	MERGE	MiniCAM
2010	32	40 (27,6 £)		nd	nd	nd
2020	43	49 (33,6 £)	40 [17-70]	54	23	20
2030	58	60 (40,9 £)	55 [22 70]	81	40	36
2050	104	88 (60,8 £)	85 [20 180]	177	120	98
Objectif ppme	Nc	450-550	450	550* (c)	550*	550*
Taux actualisation	8 %	3,5 %	4 %	(3-7 %) (d)		
Croissance de la valeur carbone	3 %	2 %	2,5 % (e)	4 % (f)	5,7 %	5,4 %

(a) *Handbook on Estimation of External Cost in Transport Sector* (produced within the study : Internalisation Measures and Policies for all External Costs of Transport, IMPACT, Delft, décembre 2007.

(b) Les valeurs données en dollars sont considérées ici comme des valeurs 2008 (le rapport a été publié en juillet 2007) ; on considère par ailleurs un taux de change compatible de 1,3 (sur la période 2004-2007, il a oscillé entre 1,2 et 1,3).

(c) 450 ppme, CO₂ seul.

(d) Le rapport Lebègue rappelle en 2005 qu'on trouve plusieurs références : le General Accounting Office indique que le taux retenu doit être égal à celui des obligations du Trésor, dont la maturité correspond à la durée des projets évalués. En 2005, ces taux étaient compris entre 3,5 % et 4%.

(e) et (f) Taux de croissance annuel recalculés sur la base des valeurs affichées en 2020 et 2050.

Source : *Centre d'analyse stratégique*

3. Positionnement à l'égard de la démarche du rapport Stern

Il est indispensable de revenir sur le rapport Stern qui constitue l'un des exercices économiques de prospective sur l'effet de serre les plus achevés à ce jour. Abondamment

médiatisé, ce travail a largement contribué à renforcer la portée des travaux scientifiques du GIEC et à forger un consensus international sur la nécessité et l'urgence de l'action. Cependant, la démarche proposée dans notre rapport s'écarte de la perspective choisie par Stern pour plusieurs raisons qu'il convient de préciser.

3.1. Une approche économique pour éclairer la décision publique

Le rapport Stern publié par le ministère des Finances britannique le 30 octobre 2006 est une étude exhaustive des implications économiques du changement climatique. Mené sous la direction de Sir Nicholas Stern, il est le fruit d'un travail collectif de près d'un an et demi réalisé par une quarantaine de chercheurs de plusieurs nationalités. Il examine, sur la base des études existantes, les conséquences économiques, sociales et environnementales du changement climatique dans les pays développés et les pays en développement, ainsi que les coûts et bénéfices liés à l'amélioration du bilan carbone de la planète, pour dresser un bilan économique complet de la lutte contre l'effet de serre.

L'un des mérites essentiels du rapport Stern¹ est d'avoir porté le débat du changement climatique sur le terrain économique, en mettant en évidence l'intérêt économique de l'action à engager et l'exigence d'efficacité des politiques publiques en matière climatique. Il reflète à ce titre un fort consensus des économistes sur la nécessité de donner un prix progressivement croissant à toutes les émissions à l'origine du changement climatique.

Ce travail montre que le « laisser-faire » en matière climatique serait plus dommageable à l'humanité que les mesures de prévention requises pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, à condition, et c'est un point important, que ces mesures soient conçues de façon à en minimiser le coût économique. Selon ce rapport, la valeur actualisée des dommages induits par le réchauffement de la planète (de 5 % à 20 % du PIB mondial de 2005 par an selon les impacts comptabilisés et les scénarios sur la sensibilité climatique) doit être mise en regard du coût, plus modeste, de la lutte contre le changement climatique évalué à près de 1 % du PIB global par an jusqu'en 2050. Le rapport souligne par ailleurs que plus l'action sera tardive, plus les efforts à mener seront « brutaux », donc coûteux.

Du côté de l'évaluation du coût social des dommages, les estimations retenues sont en moyenne plus élevées que celles produites jusqu'à présent à l'aide des modèles existants² qui tendent à sous-estimer les hausses de températures possibles et à prendre insuffisamment en compte les événements climatiques extrêmes liés à une augmentation des températures moyennes (sécheresse, inondations, tempêtes, etc.) et des « surprises » (ralentissement de la circulation des eaux dans l'Atlantique, fonte accélérée de la banquise en Antarctique, etc.).

Le rapport Stern utilise un « modèle d'évaluation intégrée » probabiliste, PAGES³ 2002, articulé autour de trois paramètres clés :

- l'existence possible de « boucles de rétroaction climatiques » aggravant les hausses initiales de température (libération du méthane piégé dans les sols gelés, affaiblissement de la capacité d'absorption des puits de carbone océaniques et forestiers) ;

(1) On trouvera une présentation critique de ce rapport dans plusieurs travaux facilement accessibles. La rédaction de ce paragraphe s'est notamment inspirée de Célestin-Urbain (2008), Godard (2007), Gollier (2007a), Hourcade et Hallegat (2007), Ambrosi et Hourcade (2007).

(2) Voir les éléments de présentation dans le chapitre précédent.

(3) *Policy Analysis of the Greenhouse Effect* : modèle écoclimatique développé par Chris Hope. Les impacts pris en compte incluent la réduction de la productivité moyenne agricole par réduction de pluviosité (la hausse de la température ayant en revanche un effet positif sur la photosynthèse), les pertes humaines et immobilières dues à l'augmentation des événements climatiques extrêmes, l'augmentation de la consommation d'énergie (air conditionné), le coût lié à l'augmentation induite des inégalités sociales sur la planète, et la perte d'actifs environnementaux (biodiversité, ressources halieutiques, etc.).

- la nature des impacts du changement climatique (marchands/non marchands) et leur mode d'apparition (progressivité/non-linéarité) ;
- les incertitudes affectent les paramètres du modèle intégré. Si les scientifiques donnent des informations assez précises de l'impact sur l'environnement d'une hausse de 2-3° C, on a en revanche très peu d'information sur les conséquences d'une hausse de 5-6° C, scénario dont la probabilité est non négligeable, même en maintenant la concentration à un niveau inférieur à 550 ppme.

Du côté des coûts d'abattement, le rapport Stern¹ identifie une combinaison de mesures permettant de réduire d'un quart les émissions de CO₂ provenant de l'utilisation des combustibles fossiles entre 2002 et 2050 (amélioration du rendement de l'offre énergétique, maîtrise de la demande d'énergie, substitution de combustibles à faibles émissions de carbone). Il calcule l'évolution du coût moyen des réductions d'émissions à partir des taux de pénétration des différentes technologies et du coût marginal d'abattement qui leur est associé (\$/tonne de carbone)² : à l'horizon 2050, le coût cumulé de réduction des émissions de CO₂ dans une optique 550 ppme s'établirait à environ 1 % du PIB de 2050³. Les estimations varient en fait entre -1 % (gain net pour l'économie) et 3 % du PIB selon les hypothèses prises pour les prix du pétrole et du gaz, la croissance de la demande d'énergie et l'innovation technologique.

Les politiques publiques doivent, selon le rapport Stern, se conformer à trois grands principes :

- être mises en œuvre de façon graduelle afin que les différents secteurs puissent s'adapter à la « contrainte carbone ». L'action publique doit mobiliser les potentiels d'abattement à faibles coûts qui existent dans certains secteurs et introduire à la fois rapidement et progressivement des incitations économiques appropriées pour les agents ;
- introduire un signal-prix dans l'économie. Le rapport marque sa préférence pour une combinaison d'instruments destinés à introduire le prix du carbone de façon explicite (marchés de permis, fiscalité) ou implicite (réglementation) dans les structures de coûts des agents ;
- investir dans la recherche. Compte tenu des imperfections de marché (incertitude sur le prix du carbone à moyen et long terme, externalités liées à la diffusion des connaissances, insuffisance de la concurrence, etc.), le seul signal-prix sur le carbone ne devrait pas être suffisant pour garantir un niveau optimal d'innovation et de déploiement des technologies déjà rentables. Le rapport Stern recommande donc un quadruplement des incitations publiques à la R & D privée (qui s'établissent aujourd'hui à 34 milliards de dollars pour les biocarburants, les énergies renouvelables et le nucléaire) et un accroissement significatif de l'effort public, notamment dans le domaine de l'énergie (de 10 milliards à 20 milliards de dollars).

(1) Voir pour plus de détail sur ces différents éléments l'étude réalisée par Dennis Anderson, *Costs and Finance of Abating Carbon Missions in the Energy Sector*, octobre 2006.

(2) Les coûts relatifs des différentes technologies par unité d'énergie produite sont déterminés par rapport à ceux des technologies ou des sources d'énergie de référence : charbon et gaz pour la production d'électricité, essence et gazole pour les transports, gaz pour le chauffage industriel et résidentiel. Les prix de base des combustibles sont fixés à 50 dollars le baril de pétrole brut et à 6 €/GJ pour le gaz naturel. Le rapport tient compte des incertitudes relatives à l'évolution du prix des combustibles et du coût en capital des technologies sobres en carbone en simulant plusieurs distributions de coûts pondérées par leur probabilité, le tout étant agrégé grâce à la méthode de Monte Carlo.

(3) Le PIB mondial de 2005 (35 000 milliards de dollars) est affecté d'un taux de croissance annuel de 2,5 % et atteindrait donc 110 000 milliards de dollars en 2050. À titre de comparaison, la croissance potentielle en France est estimée entre +1,8 % et +2,1 % par an selon les décennies d'ici à 2050.

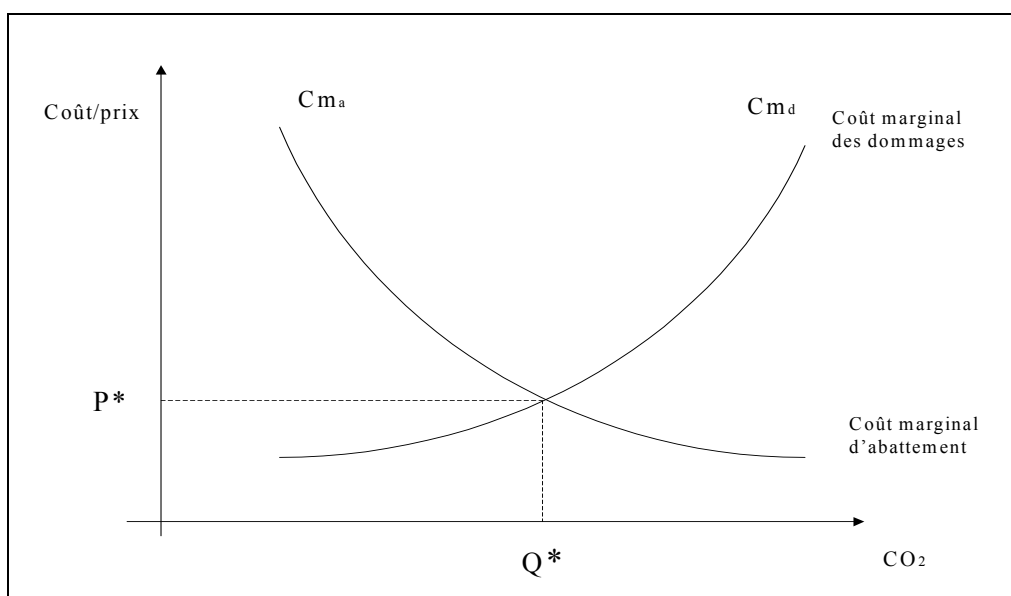
3.2. L'approche coûts/efficacité et l'approche coûts/avantages

Les travaux engagés dans le cadre du rapport Stern s'inscrivent dans une approche coûts/avantages qui consiste à imputer à chaque instant au carbone la valeur actualisée des dommages provoqués par l'émission « marginale » d'une unité supplémentaire dans l'atmosphère. Comme on l'a vu, une seconde approche d'« optimisation sous contrainte », dite coûts/efficacité, est possible, où la valeur du carbone et son cheminement temporel reflètent le niveau de contrainte appliqué à un système économique au regard d'un objectif donné de réduction des émissions de carbone.

3.2.1. L'approche coûts/avantages

L'économie de l'environnement aborde le climat sous l'angle d'un bien collectif à préserver ou sous l'angle d'une externalité négative (émissions de CO₂) à internaliser dans le fonctionnement des marchés. Dans ce second cas, 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 associé à l'émission d'une tonne supplémentaire de CO₂ dans l'atmosphère et le coût marginal de réduction des émissions de CO₂. Ce principe constitue le socle de l'analyse coûts/avantages. C'est ce qu'illustre le graphique simplifié n° 9, où sont représentées la courbe du coût marginal des dommages et la courbe du coût marginal d'abattement. Plus la concentration de CO₂ est importante, plus le coût des dommages résultant d'une émission supplémentaire augmente ; plus on diminue la concentration de CO₂, plus le coût marginal d'abattement augmente. L'égalisation des coûts marginaux permet de dégager une quantité optimale d'émission Q* et le prix qui lui est lié p*.

Graphique n° 9 : Approche coûts/avantages



Source : Centre d'analyse stratégique

Cette approche traditionnelle présente, dans le contexte du changement climatique, deux difficultés particulières :

- la première est celle de la légitimité d'une approche marginaliste. En effet, les avantages et les coûts sont en général évalués en supposant que l'action entreprise n'a pas d'effet

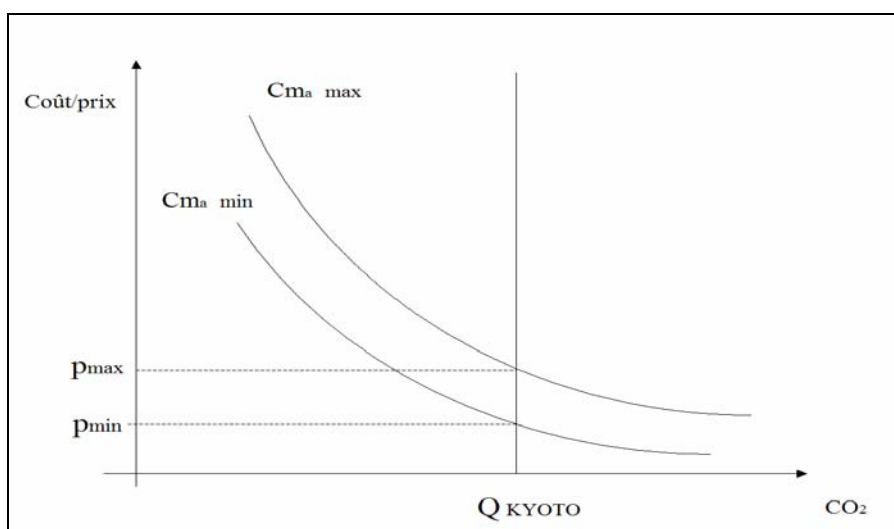
sur le système de prix, ce qui ne tient que si celle-ci est de faible intensité. L'instauration d'une valeur du carbone sur les quarante prochaines années va, au contraire, modifier de façon non marginale le système de prix et les stratégies de recherche et d'investissement des acteurs, donc les prix d'équilibre, donc les avantages et les coûts. Les modèles économiques, qui tiennent compte de l'impact de la valeur du carbone sur les prix et les comportements, permettent toutefois de prendre en compte cette spécificité ;

- la seconde difficulté réside dans les incertitudes qui pèsent sur ces courbes des dommages et des coûts d'abattement, dont on ne connaît précisément ni les pentes ni les positions. Ces incertitudes renvoient de manière concrète à l'appréciation du progrès technique et des élasticités-prix. L'introduction de l'incertitude sur ces deux courbes introduit une incertitude sur le bon niveau de réduction et sur le bon niveau de prix à introduire dans le système marchand.

3.2.2. L'approche coûts/efficacité

Une seconde approche consiste à définir *ex ante* un objectif de réduction des émissions défini 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.

Graphique n° 10 : L'approche coûts/efficacité



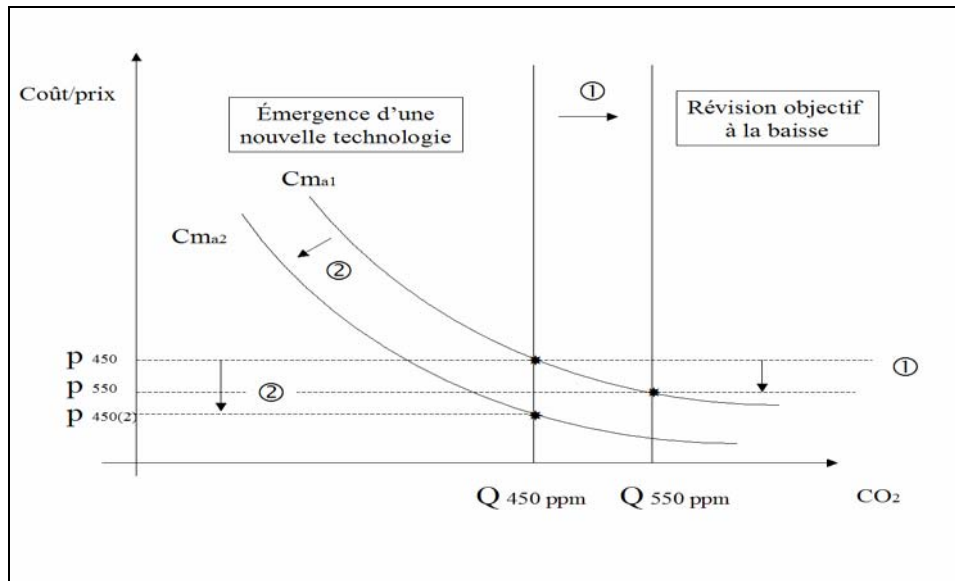
Source : Centre d'analyse stratégique

La valeur d'équilibre dépend principalement de deux variables :

- le niveau des objectifs de réduction des émissions ;
- les technologies disponibles pour réduire les émissions.

Moins l'objectif de réduction est ambitieux (cas 1 illustré dans le graphique n° 11), plus la valeur du carbone nécessaire est faible. De même, plus les technologies sont performantes (cas 2), plus les coûts marginaux d'abattement sont faibles, plus faible également est la valeur nécessaire du carbone.

Graphique n° 11 : Variations de la valeur d'équilibre



Source : Centre d'analyse stratégique

3.2.3. La complémentarité des approches

Chaque approche a ses mérites et ses difficultés :

- l'approche coûts/avantages suppose que l'on puisse estimer et actualiser les flux de dommages issus du réchauffement climatique à partir d'hypothèses de concentration atmosphérique de gaz à effet de serre et de hausse des températures. Les controverses qui ont entouré la publication du rapport Stern¹ 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 valeur qui sera nécessaire pour y parvenir, compte tenu de la sensibilité des comportements des agents économiques au prix et des anticipations sur le progrès technique. L'une des difficultés réside dans la modélisation dynamique des comportements de réponse aux prix, des courbes d'apprentissage sur les technologies et des hypothèses sur les innovations futures.

Ces deux approches sont complémentaires. L'approche coûts/avantages 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 effort donné une valeur carbone cohérente avec l'objectif de réduction des émissions. *In fine*, si le niveau de réduction est fixé au niveau optimal, les valeurs de carbone données par les deux approches doivent converger.

(1) Le rapport Stern n'applique pas en toute rigueur l'analyse coûts/avantages dans la mesure où il ne raisonne pas à la marge. En effet, le niveau optimal d'efforts correspond au niveau où le coût d'abattement marginal des émissions est égal au coût social marginal des dommages évités par l'abattement des émissions. Il compare le coût total des dommages au coût total de l'action pour en déduire que le coût de l'action est inférieur au coût de l'inaction et pour recommander un objectif raisonné de plafond d'émissions.

C'est l'approche coûts/efficacité qui a été retenue ici, pour deux raisons :

- elle présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre plus aisément dans le cadre des modèles existants, en tirant profit des projections internationales les plus récentes (projections macroéconomiques de long terme de l'OCDE et scénarios de l'AIE).
- les objectifs de politique climatique qui serviront de base à la détermination de la valeur du carbone sont désormais correctement balisés depuis l'adoption en France du « facteur 4 » à l'horizon 2050 (loi POPE de 2005) et les engagements pris au plan européen au printemps 2007 (engagement unilatéral de réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2020 ou de 30 % en cas d'accord international).

La commission prend donc acte des objectifs pris par la France et l'Europe et recherche la valeur du carbone cohérente avec ces objectifs. Dans un tel contexte, il n'est plus nécessaire de se référer aux analyses des dommages de l'effet de serre. On suppose que ces éléments, ainsi que les autres connaissances scientifiques pertinentes, ont été pris en compte dans le processus de définition des objectifs politiques.

3.3. La question du taux d'actualisation

Le rapport Stern a retenu un taux d'actualisation (1,4 %) très faible au regard des standards habituellement utilisés¹, ce qui a fait l'objet de vives controverses² dans la communauté des économistes. C'est l'une des raisons qui expliquent les divergences d'évaluation des dommages entre cet exercice et d'autres travaux de référence sur le sujet. De fait, pour chacun des paramètres de l'actualisation, le rapport retient des valeurs plus faibles que celles qui sont admises dans l'analyse économique standard et qui sont à la base du taux d'actualisation recommandé par le rapport Lebègue.

- La préférence pure pour le présent est fixée par Stern à 0,1 %. Ce chiffre met sur un pied d'égalité les générations présentes et futures, le 0,1 % reflétant la probabilité supposée de disparition de l'humanité. L'évaluation de cette préférence reste inférieure à la majorité des estimations existantes (1 % à 2 %). Le rapport Lebègue avait retenu pour sa part une valeur de 1 % qui représentait un compromis entre la recherche de l'équité intergénérationnelle et la prise en compte des évaluations sur les arbitrages d'épargne et de consommation des ménages.

(1) Pour établir le bilan socioéconomique des investissements publics, le Centre d'analyse stratégique prône l'utilisation d'un taux d'actualisation hors prime de risque et coût d'opportunité des fonds publics de 4 %, qui décroît au bout de 30 ans avec un plancher à 2 %. Le Trésor britannique (Livre vert de 2003) recommande 3,5 % pour des évaluations effectuées sur un horizon de 30 ans, décroissant jusqu'à 1 % au-delà de 300 ans. Comme l'explique le rapport Lebègue, la raison pour laquelle il peut être justifié de faire décroître le taux au bout d'un certain temps tient à l'incertitude sur l'effet richesse : l'absence de projections fiables sur la croissance économique à (très) long terme va conférer une place plus importante à l'effet « précaution », qui incite la génération actuelle à faire d'autant plus d'efforts que la génération future est éloignée.

(2) Trois auteurs américains ont été particulièrement critiques envers l'analyse de Stern. Nordhaus (2007) considère ce rapport comme un document plus politique que scientifique et reproche l'utilisation d'un « taux d'actualisation quasi nul ». Mendelsohn (2007) lui reproche un biais catastrophiste dans le choix de ses hypothèses et s'oppose à l'idée que les coûts d'abattement se réduiront rapidement à l'avenir. Weitzman (2007) n'est pas opposé à l'usage d'un taux d'actualisation faible, mais il concentre sa critique sur l'hypothèse d'un taux réel de croissance de la consommation de 1,3 % par an sur les 200 prochaines années, ce qu'il pense être une hypothèse moyenne pessimiste, et défend l'idée qu'il faut prendre en compte le fait que ce taux de croissance est non seulement aléatoire, mais que sa distribution de probabilité est inconnue. Par ailleurs, si on raisonne en cas incertain et que l'on se donne la possibilité de réévaluer la décision sous forme d'une décision séquentielle, le rôle du taux d'actualisation devient de second ordre (Ha-Duong *et al.*, 1996). On se reportera également à l'article très vif de Tol (2006).

- L'élasticité de l'utilité marginale à la consommation est considérée par Stern égale à 1¹, ce qui signifie que lorsque la richesse double, l'utilité marginale d'une même unité de consommation est divisée par deux. La commission Lebègue avait retenu pour sa part un coefficient de 2.
- Le taux de croissance annuel par tête retenu dans le rapport Stern est de 1,3 %, soit le scénario du GIEC le plus bas (le scénario le plus « optimiste » étant de 2,8 %). Ce point est essentiel : plus élevée est la richesse anticipée des générations futures, plus faible doivent être les efforts consentis aujourd'hui pour réduire les impacts du changement climatique à long terme. Le rapport Lebègue avait quant à lui retenu pour la France une référence de 2 % intégrant un effet précaution, compte tenu de l'incertitude sur la croissance économique. Ce dernier chiffre était cohérent avec un scénario où l'on suppose que la croissance économique par tête peut varier entre deux extrêmes : 2 % avec une probabilité de deux tiers et 0,5 % avec une probabilité d'un tiers.

Au-delà de ces différences dans la construction du taux d'actualisation, il convient de préciser que les évaluations de la valeur carbone entreprises par Stern et celles de cette commission répondent à des objectifs différents :

- l'objectif du rapport Stern est de donner une valeur actuelle aux dommages liés au réchauffement climatique sur un horizon dépassant le siècle. Le taux d'actualisation joue un rôle décisif puisque, par définition, l'actualisation conduit à minorer la valeur actuelle de coûts éloignés dans le futur ;
- la question se pose différemment lorsqu'il s'agit de satisfaire certaines contraintes d'émissions fixées à l'avance. C'est pourquoi cette commission ne remet pas en question le taux d'actualisation recommandé par le rapport Lebègue et utilisé dans le calcul économique public. Elle retient le principe d'une valeur croissante de la valeur carbone, dans la mesure où c'est en jouant sur le prix relatif de la valeur du carbone qu'on intègre correctement le coût du changement climatique dans les calculs. Ce faisant, la commission donne à l'effet de serre un poids dans le calcul économique public qui n'est pas très éloigné de celui proposé par le rapport Stern, puisque la valeur carbone croît dans le temps et n'est donc pas affectée par le taux d'actualisation.

(1) C'est ce coefficient que le Trésor britannique avait retenu dans sa révision du taux d'actualisation. La plupart des économistes de la décision en incertitude considèrent que cette fonction d'utilité génère une aversion au risque trop faible par rapport à ce que l'on peut déduire des comportements effectifs des ménages, notamment dans leur choix de portefeuille ou d'assurance. Voir sur ce point les travaux de Christian Gollier.

Chapitre 4

Les enseignements de l'analyse économique de l'environnement

L'élaboration d'une valeur tutélaire du carbone suppose de préciser plusieurs questions de principe :

- l'unicité de la valeur tutélaire. Une référence unique permet d'égaliser le coût marginal d'abattement du carbone dans toute l'économie et de minimiser ainsi les coûts engagés pour accomplir un effort global donné ;
- la règle d'évolution de la valeur du carbone dans le temps pour optimiser la gestion du « budget carbone » défini au niveau politique ;
- l'articulation de l'évolution dans le temps du prix des énergies fossiles et de la valeur du carbone ;
- la prise en compte de l'incertitude sur les objectifs et sur le progrès technologique futur.

Ce chapitre donne quelques points de repère, sans prétendre apporter de réponses définitives à des questions qui continuent d'alimenter la recherche économique.

1. Une valeur unique du carbone, qui peut se décliner de manière différenciée au niveau des instruments de politique économique

Pour appréhender la question de la valeur du carbone, il est indispensable de distinguer deux niveaux :

- la définition de la valeur tutélaire ;
- la mise en œuvre de cette valeur tutélaire dans le calcul économique public, l'évaluation et le calibrage des instruments économiques.

1.1. Les enjeux d'un référentiel unique

1.1.1. *Les raisons de l'unicité du référentiel*

Pour les économistes, une référence unique permet d'égaliser le coût marginal d'abattement du carbone dans toute l'économie et de minimiser les coûts engagés pour accomplir un effort global donné. S'en écarter, c'est accepter une inefficacité globale qui peut être très coûteuse pour la collectivité : on aurait pu atteindre un même objectif global de réduction à un coût moindre ; on aurait pu atteindre un objectif plus ambitieux de réduction avec le même niveau d'effort.

- Dans une perspective coûts/avantages, le coût occasionné à la collectivité par une émission de CO₂ ne dépend pas de l'endroit où ces gaz sont émis, ni du secteur économique qui l'émet. Une tonne de CO₂ a bien le même effet, qu'elle soit émise par une automobile ou par une cimenterie, en France, aux États-Unis, ou en Chine. Le signal qu'il convient de donner pour optimiser l'effort est fonction du coût d'abattement des émissions, et plus précisément, du coût marginal d'abattement. Si la collectivité veut optimiser son action, elle doit commencer par réduire les émissions là où elles sont les moins coûteuses. Elle poursuit son effort de telle manière que l'avantage qu'elle en retire soit égal au coût de ce même effort. Si l'on classe tous les projets possibles par coût croissant, en commençant à réduire les émissions là où elles sont les moins coûteuses, il arrive un moment où la contrainte est respectée. La valeur carbone est, par définition, révélée par le dernier coût d'abattement. Cette référence ne peut donc qu'être unique, bien que les courbes de coûts d'abattement soient très différentes d'un secteur à l'autre, d'une région à l'autre, d'une période à une autre.

- L'application de ce raisonnement normatif simple est discutée dans la communauté scientifique lorsqu'il s'agit d'assurer la reproduction à long terme de l'environnement, notamment lorsque celui-ci est marqué par des ruptures, des irréversibilités dans lesquelles se jouent les conditions d'existence futures du monde. Dans ce cas, le raisonnement à la marge peut ne plus être adapté : ces difficultés conduisent certains économistes à comparer plus globalement les coûts de prévention et les coûts de restauration et non les bénéfices marginaux et les coûts marginaux. Cette difficulté peut être levée à partir du moment où l'on raisonne sur la minimisation des coûts pour un objectif donné de manière exogène.

- Dans une perspective coûts/efficacité, en effet, on ne considère plus le coût social des dommages mais l'effort nécessaire pour respecter une contrainte sur les émissions (niveau et rythme de réduction). Cette règle d'unicité de la valeur et d'égalisation des coûts marginaux d'abattement dans une économie confrontée à cette contrainte est robuste et repose sur une intuition simple : supposons qu'il existe deux agents ayant des coûts marginaux différents à l'équilibre, parce que confrontés à des signaux-prix différents. Dans ce cas, un transfert de l'effort de réduction des émissions de l'agent au coût marginal le plus élevé vers l'autre agent permet de réduire le coût total d'abattement tout en maintenant l'effort global inchangé. Dans un tel contexte, la valeur carbone ne fait que traduire le prix implicite que cette contrainte impose.

1.1.2. L'espace géographique pertinent de définition du référentiel

La lutte contre le changement climatique constituant un bien public mondial, la solution la plus efficace pour la planète serait de pouvoir définir une valeur de référence du carbone unique et globale. La définition d'un tel référentiel traduirait une volonté commune des pays émetteurs de gaz à effet de serre de participer à la lutte contre le changement climatique. Dans un tel contexte, la valeur de référence du carbone serait :

- d'autant plus élevée que l'objectif mondial de réduction des émissions serait ambitieux ;
- d'autant plus faible que les efforts seraient coordonnés, *via* par exemple la mise en place d'un marché mondial de permis d'émissions.

Dans la mesure où il existe de grandes différences géographiques des coûts d'abattement, plus on raisonne sur des espaces restreints plus on prend le risque d'avoir des valeurs élevées pour un même niveau de contrainte. Plus on considère un espace élargi, plus le référentiel pour un même niveau de contrainte pourra être faible.

Étant donné qu'il est aujourd'hui impossible de prévoir avec certitude quelle sera la place des mécanismes d'échanges de quotas CO₂ au plan mondial, les scénarios retenus pour la modélisation envisagent plusieurs états du monde possibles : faible niveau de flexibilité et

cloisonnement des efforts, prix uniforme du carbone à l'échelle mondiale, etc. Il importe cependant à ce stade de souligner les éléments suivants :

- la commission propose une valeur de référence française, en l'absence de valeur de référence fixée au niveau européen ;
- cette valeur française est fixée en prenant pleinement en compte la dimension européenne de la politique de lutte contre le changement climatique, en particulier la définition des objectifs de réduction des émissions et l'égalisation des prix sur le marché ETS.

1.2. Une différenciation possible au niveau des instruments économiques

L'unicité du référentiel carbone peut s'accommoder d'une déclinaison différenciée au niveau des usages qui peuvent en être fait.

1.2.1. Une première source de différenciation porte sur les instruments économiques mobilisables

Les instruments économiques capables d'internaliser la contrainte carbone ont eu tendance à se diversifier au cours des années récentes, grâce notamment à la mise en place des marchés de permis et à l'apport des nouvelles technologies. Jadis confrontés à l'alternative taxe/réglementation, les pouvoirs publics ont aujourd'hui à leur disposition une palette d'instruments plus large : normes, certificats verts, permis d'émission, péages urbains, taxes et dépenses fiscales, *bonus malus*, subventions à la recherche et développement, etc.

Il n'appartient pas à ce rapport de définir les règles d'affectation de chacun de ces instruments et leurs combinaisons possibles. Trois points méritent ici d'être soulignés :

- les pouvoirs publics peuvent s'appuyer sur une large gamme d'instruments pour calibrer une intervention qui satisfasse simultanément des objectifs environnementaux et des objectifs de redistribution ;
- la valeur du carbone nécessaire pour atteindre un objectif d'émissions donné dépend pour une large part des technologies disponibles. Plus vite les technologies permettant d'économiser la consommation d'énergies fossiles ou de capturer et de stocker le CO₂ seront disponibles, moins la valeur tutélaire du carbone aura besoin d'être élevée. La capacité des pouvoirs publics à stimuler la recherche et développement vers des solutions sobres en carbone a vocation à jouer un rôle décisif pour atteindre un objectif d'émissions donné au moindre coût ;
- tandis que les infrastructures sont marquées par un degré élevé d'irréversibilité, les instruments économiques peuvent être ajustés plus aisément au cours du temps, et intégrer les révisions ultérieures de la valeur tutélaire du carbone.

1.2.2. Une deuxième source de différenciation peut porter sur les secteurs économiques concernés

Même si l'introduction d'un signal-prix identique dans tous les secteurs de l'économie constitue en première analyse le moyen le plus économique pour atteindre un objectif environnemental donné, plusieurs arguments peuvent justifier une différenciation entre secteurs. Ces arguments, déjà largement évoqués dans le rapport Landau, méritent ici d'être brièvement rappelés :

- les situations de départ sont très différentes d'un secteur à l'autre. Le poids du carbone n'est pas le même dans tous les produits ; les taxes et réglementations existantes pèsent également dans des proportions variables selon les secteurs. Dans un tel contexte, il est

clair qu'introduire un même signal carbone dans l'ensemble de l'économie aboutirait à des variations relatives de prix – et donc des chocs – d'inégale ampleur selon les activités ;

- il existe des inerties liées au capital – équipements industriels, infrastructures de transports et bâtiments – dont le renouvellement ne peut être que très progressif, pour des raisons liées à la durée de vie des équipements ainsi qu'aux choix d'urbanisme et d'aménagement du territoire ;
- dans les domaines où la sensibilité des agents économiques aux prix est limitée par la faiblesse des alternatives disponibles, le signal-prix peut être abaissé pour éviter d'induire des transferts de revenus importants. Dans les domaines où il faut au contraire changer le poids des habitudes, le signal-prix doit être fort pour faire « basculer » les comportements et faciliter l'apprentissage de solutions alternatives ;
- les secteurs économiques n'ont pas le même degré d'exposition à la concurrence internationale ni la même capacité à répercuter le prix des permis ou les taxes sur le consommateur final.

2. La trajectoire optimale de la valeur carbone

Plusieurs arguments sont évoqués dans la littérature économique pour justifier une trajectoire croissante dans le temps de la valeur carbone :

- la société a intérêt à exploiter en priorité les gisements d'abattement à faibles coûts aujourd'hui disponibles, avant d'aller « chercher » les gisements plus coûteux ;
- le coût marginal des dommages augmente dans le temps avec la concentration accrue de gaz à effet de serre ;
- les objectifs de réduction d'émissions se font de plus en plus ambitieux ;
- l'enveloppe d'émissions jugée acceptable peut être assimilée à une ressource non renouvelable ou à un actif qu'il faut gérer dans le temps.

C'est sur ce dernier élément que se concentrent les développements qui suivent.

2.1. Un modèle simplifié de contrôle optimal pour appréhender la gestion des ressources épuisables : la règle de Hotelling

Dans le cas de la lutte contre le réchauffement climatique, le problème de la bonne gestion d'une contrainte carbone qu'on s'impose collectivement peut être ramené au cadre théorique classique qui donne les règles à suivre pour assurer la gestion optimale d'une ressource épuisable¹. Ce cadre trouve son origine dans les travaux de Gray (1914) et surtout de Hotelling² (1931). Ces auteurs construisent, sur la base d'un raisonnement microéconomique de maximisation de l'utilité associée à la consommation de ces biens, un outil d'analyse de

(1) Elle peut être également utilisée pour d'autres ressources *a priori* renouvelables : par exemple les ressources halieutiques, la gestion des forêts ou encore les nappes d'eau souterraines.

(2) Hotelling H., "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, 39, 1931, 137-175. Cet article poursuivait un double objectif : construire un indicateur de valeur lié au caractère épuisable d'une ressource non renouvelable, en particulier des ressources minérales, et comparer les performances, en termes de conservation à long terme de ces ressources, d'une industrie parfaitement concurrentielle et d'un monopole ou d'un quasi-monopole minier.

l'évolution des prix de ces ressources (analyse positive¹) et de manière plus ambitieuse une règle optimale d'extraction de la ressource (analyse normative²).

Dans sa formulation la plus simple, la règle de Hotelling énonce que le prix unitaire d'une ressource naturelle non renouvelable dont les réserves sont connues au départ doit croître à un taux égal au rendement qui serait obtenu en investissant dans des actifs alternatifs. Même dans un contexte concurrentiel, le prix de la ressource excède ainsi son coût d'extraction et incorpore une rente de rareté³ qui reflète le caractère épuisable de la ressource.

Il faut noter la robustesse d'un résultat qui renvoie à un arbitrage inter-temporel : le décideur doit être indifférent entre retirer une unité supplémentaire du stock de ressources naturelles aujourd'hui ou le faire demain — ces deux actions doivent avoir exactement la même valeur, ou la même utilité sociale si l'on se place du point de vue de la collectivité. Pour qu'il en soit ainsi, il faut que le prix associé à ce bien croisse dans le temps au rythme du taux d'intérêt ou encore du taux d'actualisation.

Cette présentation en reste à une formulation très épurée : la théorie a connu de nombreux développements dans la littérature pour explorer les conséquences de l'introduction d'éléments plus réalistes comme la prise en compte des coûts d'extraction, l'absence de connaissance parfaite des réserves disponibles, l'impact du progrès technique ou l'évolution de la demande dans le temps.

2.2. L'adaptation de la règle de Hotelling à l'effet de serre

L'engagement de réduction des émissions de gaz à effet de serre pose un double problème :

- la détermination du plafond de concentration de gaz dans l'atmosphère à ne pas dépasser ;
- la répartition optimale dans le temps des efforts qu'il convient d'entreprendre pour atteindre l'objectif fixé.

Ces deux problèmes peuvent être ramenés à une même question : celle de la valeur de la tonne de carbone qu'il faut introduire à chaque instant dans le système socioéconomique pour caler les niveaux d'émissions sur ce plafond et cette trajectoire une fois définis.

Depuis plus de 20 ans⁴, la question du sentier optimal de la valeur carbone a fait l'objet de nombreux travaux, aussi bien analytiques que numériques : les modèles de Nordhaus (1980, 1982, 1990, 1993), développés en univers certain, ou plus récemment des travaux en univers incertain, dans lesquels les informations qui permettent de lever les incertitudes arrivent au cours du temps, ont alimenté la réflexion et ont été régulièrement repris dans les rapports du GIEC⁵.

(1) Dans cette perspective, on cherche à expliquer les évolutions que l'on observe. Ce fut d'ailleurs un point de controverses puisque l'observation des prix du pétrole sur de longues périodes indiquait au contraire qu'il baissait !

(2) Dans cette perspective, au contraire, la théorie vise à donner les règles (au propriétaire privé ou à la collectivité) qu'il faudrait mettre en œuvre pour obtenir une situation optimale du point de vue économique.

(3) Terme qu'il faut distinguer précisément de la rente de monopole, mais aussi de la notion de rente différentielle (rente ricardienne qui intervient du fait de l'existence de différences de coût d'extraction entre les gisements).

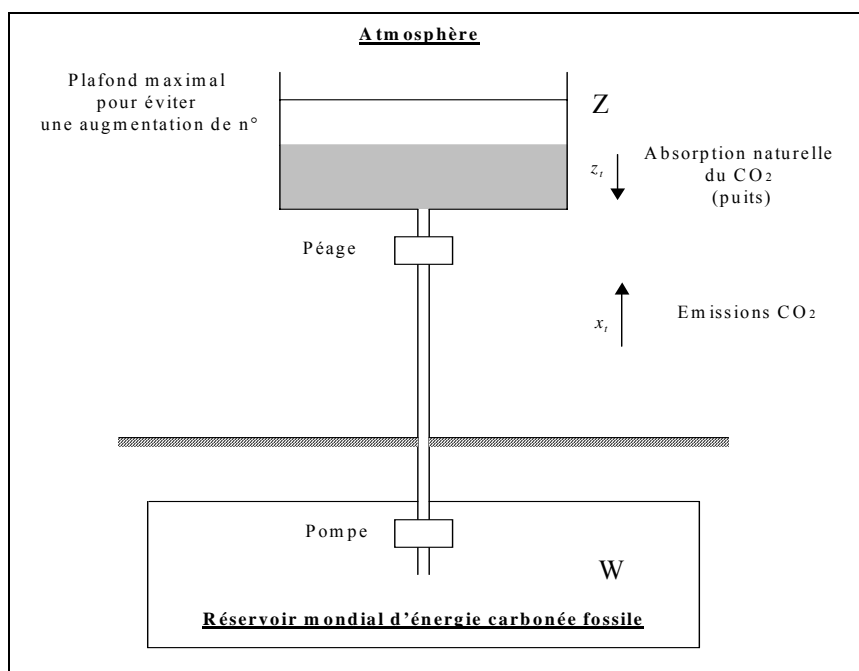
(4) On trouvera un point plus précis dans une note transmise et présentée au groupe de travail : *Quelques enseignements de l'état de l'art concernant le sentier optimal du prix du carbone*, CIRED, février 2008.

(5) Voir sur ce point les contributions : Hammitt *et al.* (1992), Hourcade (1997), Ha-Duong *et al.* (1997)

2.2.1. *Un schéma simple¹ permet de considérer une situation dans laquelle la collectivité se fixe un plafond sur les émissions de CO₂*

Considérons qu'il existe un stock d'énergies fossiles disponibles pour la consommation, qu'on nomme ici W . Notons qu'il s'agit bien de l'ensemble des ressources fossiles : le pétrole, mais aussi le gaz naturel et surtout le charbon qui pourrait à l'avenir jouer un rôle important. Considérons par ailleurs qu'il existe une concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à laquelle on associe un niveau moyen de température et qu'on ne souhaite pas dépasser. Cette contrainte quantitative n'est pas géologique, mais politique : la communauté internationale décide d'un niveau maximum de concentration, et fixe donc un stock fini de CO₂ à émettre, noté Z .

Graphique n° 12 : Effet de serre et limites quantitatives sur le CO₂



Source : Centre d'analyse stratégique, d'après une présentation de Joël Maurice (ENPC)

Chaque fois qu'on prélève et consomme une partie de ce stock d'énergie carbonée fossile (W), on augmente le niveau de concentration d'un flux désigné ici par x_t . Dans le même temps, le système absorbe naturellement un flux z_t pendant la même période.

Une fois ce niveau Z maximal fixé (c'est-à-dire un plafond de concentration ou de température), la question est de déterminer l'intensité de la contrainte à mettre sur la consommation pour ne pas dépasser cette limite. Traduire cette contrainte sous la forme d'un prix (d'un péage) revient à déterminer la valeur du carbone. Cet exercice correspond assez précisément à celui qui faisait l'objet des travaux de Hotelling :

- dans la période actuelle, les émissions de CO₂ sont supérieures aux mécanismes naturels d'absorption (x_t est supérieur à z_t), ce qui signifie que la concentration de CO₂ augmente, ainsi que la température ;

(1) On doit cette présentation originale à Joël Maurice (ENPC).

- sans « péage » mis sur ces consommations, l'ensemble du stock d'énergies fossiles W serait consommé et le niveau Z serait dépassé.

Admettons maintenant qu'un « péage » soit introduit de manière à réduire suffisamment x_t , afin d'atteindre le plafond Z à une date déterminée sans le dépasser.

- À compter de cette date, il sera toujours possible de continuer à prélever dans le stock d'énergies fossiles, mais à condition de le faire au même rythme que l'absorption naturelle¹.
- On émettra alors autant de gaz à effet de serre que le système peut en absorber de lui-même². On pourra consommer l'ensemble des énergies fossiles (« vider » W) dans le temps, mais l'épuisement en sera repoussé à un horizon très lointain.

Cette rapide description permet de comprendre que la question posée par la gestion des gaz à effet de serre peut être ramenée à une question d'arbitrage inter-temporel.

2.2.2. Articulé dans le temps les contraintes d'épuisement de la ressource en énergies fossiles et la contrainte de réduction des émissions de CO_2

Lors de la première période, avant que le plafond du maximum de concentration de CO_2 (Z) soit atteint à la date T_1 , la règle de Hotelling s'applique et la valeur du carbone croît au taux d'actualisation ρ (augmenté du taux d'absorption naturelle le cas échéant). On l'assimile à une rente d'émission.

Lors de la seconde période, alors que le niveau maximal de concentration de CO_2 est atteint, la valeur du carbone va décroître (d'un montant correspondant à l'augmentation du prix des énergies fossiles, qui lui-même croît en raison de la rente d'épuisement des ressources fossiles). Lors de cette période, on continue à consommer de l'énergie fossile mais à un rythme qui est égal au rythme d'absorption naturelle du CO_2 . Cette période s'achève à la date T_2 où la valeur du CO_2 s'annule.

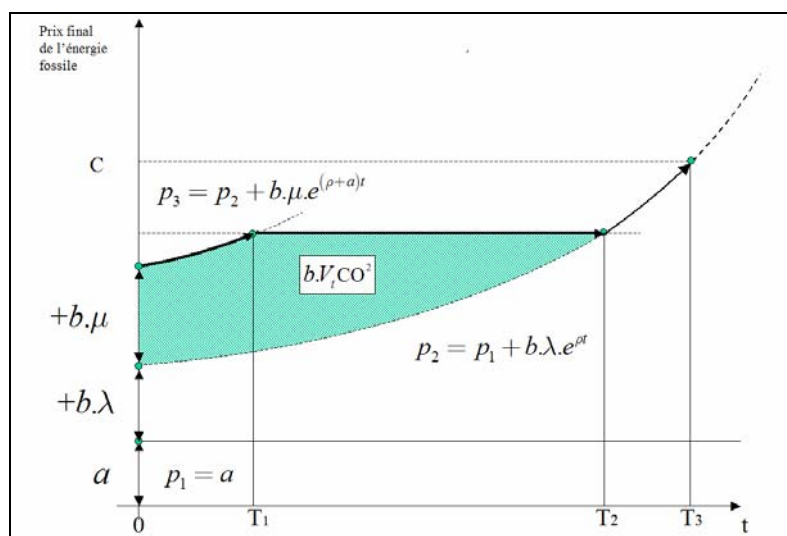
Lors de la troisième période, la valeur du carbone reste nulle, car la rente de rareté est suffisamment élevée pour que la consommation annuelle d'énergies fossiles soit inférieure à l'absorption naturelle de CO_2 par les puits de carbone.

Enfin, les réserves d'énergies carbonées fossiles s'épuisent à la date T_3 , où le prix (extraction plus rente de rareté) devient égal au prix pour lequel les énergies non carbonées permettent de satisfaire 100 % de la demande mondiale d'énergie. Celle-ci est alors exclusivement satisfaite par l'offre d'énergie non carbonée, pour un prix d'équilibre (c) qui est très élevé, à moins d'envisager une accélération très forte du progrès technique.

(1) On notera que l'intégration dans le raisonnement des puits de pétrole fait basculer la question de la gestion optimale d'une ressource épuisable à celle un peu différente de la gestion d'une ressource en partie renouvelable.

(2) À moins de considérer qu'on peut augmenter ce prélèvement de manière artificielle (c'est tout l'enjeu de la séquestration du carbone : captation du carbone, renforcement des puits naturels).

Graphique n° 13 : Valeur carbone et périodes de transition¹



Source : Centre d'analyse stratégique, d'après une présentation de Joël Maurice (ENPC)

Ce modèle simplifié suppose notamment que les énergies non carbonées prennent le relais à l'horizon T_3 , alors qu'en réalité la substitution sera progressive. Il suffit à ce stade d'indiquer que les dates T_1 , T_2 et T_3 précitées se situent à des horizons suffisamment éloignés, et donc de considérer que la valeur du carbone suit en première approximation la règle de Hotelling à l'horizon 2050. On verra dans les simulations quantitatives de ce modèle que la période T_2 pourrait débiter avant la fin de ce siècle.

Le long de ce sentier optimal, la collectivité fait en sorte de caler ses efforts de manière qu'il lui soit équivalent de réduire davantage du CO_2 aujourd'hui que de transférer des capitaux aux générations futures pour réaliser ces efforts supplémentaires.

2.2.3. Un modèle économique de contrôle optimal d'une ressource rare et polluante

Un modèle économique de contrôle optimal simplifié² permet de formaliser le raisonnement précédent. Dans ce modèle, la satisfaction de chaque consommateur est à chaque instant une fonction croissante du flux d'énergie fossile carbonée qu'il consomme directement ou qu'il utilise pour produire les biens ou services qu'il consomme. Ces consommations d'énergies fossiles cumulées au cours du temps sont soumises à une double contrainte quantitative : l'épuisement des ressources mondiales existantes d'une part, le plafond de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère d'autre part. La démarche se résume en un calcul simple consistant à répartir les quantités d'énergies fossiles utilisables au cours du temps, de façon à maximiser la satisfaction inter-temporelle des consommateurs, ou, ce qui revient au même, à minimiser le coût social dû aux limitations pesant sur l'usage cumulé des énergies carbonées fossiles.

(1) On rappelle que :

- a est le coût de production (supposé constant pour simplifier) d'une tep (tonne d'équivalent pétrole) d'énergie carbonée fossile ;
- b représente les émissions de CO_2 produites par tep d'énergie carbonée fossile ;
- c est le niveau atteint par le prix de l'énergie des énergies non carbonées, tel que 100 % de la demande mondiale d'énergie soit satisfaite par l'offre d'énergie non carbonée ;
- ρ est la rente de rareté pour une tep d'énergie carbonée fossile, à l'instant 0 (due au caractère épuisable des ressources mondiales en énergies carbonées fossiles) ;
- μ est la rente d'émission par tonne de CO_2 émise, à l'instant 0 (due au plafonnement de la teneur en CO_2 de l'atmosphère).

(2) Cette démarche s'appuie sur les principaux développements disponibles aujourd'hui dans la littérature : Ulph et Ulph (1997), Chakravorty, Moreaux et Tidball (à paraître).

Modélisation théorique simple de la gestion d'un « budget carbone »

On considère :

- que les agents économiques retirent une utilité $U(R_t)$ de la consommation à l'instant t des énergies fossiles ;
- qu'on dispose d'un taux d'actualisation ρ qui permet de pondérer ces différentes utilités en fonction du temps.

On cherche alors à résoudre le programme de maximisation d'une expression qui somme toutes les utilités générées dans le temps par la consommation de cette ressource fossile.

$$\text{Max} \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(R_t) dt$$

Cette maximisation est établie sous trois contraintes :

$$\dot{S}_t = -R_t$$

$$\dot{M} = \varepsilon R_t - \alpha M_t$$

$$M_t \leq Z$$

$$S_0, M_0 \text{ étant donnés}$$

La première contrainte considère que l'extraction et la consommation de la ressource R diminue un stock fini S (ressources mondiales existantes), dont on connaît le niveau à l'instant t .

La seconde contrainte considère que la concentration de CO_2 , M , augmente avec les émissions qui sont elles proportionnelles à l'extraction de R (d'un coefficient constant ε) et diminue avec l'absorption naturelle du CO_2 (qui est égale à une fraction α de la concentration de l'atmosphère en CO_2).

La troisième considère que la concentration de l'atmosphère ne doit pas dépasser un niveau considéré comme dangereux noté Z .

L'outil mathématique associé à chacune de ces contraintes des coefficients qui permettent la résolution du problème et dont le sens économique est le suivant :

$\lambda_t > 0$, désignant le prix implicite de la ressource (rente de rareté)

$\mu_t > 0$, désignant le prix implicite du stock de carbone (valeur carbone)

$\omega_t > 0$, multiplicateur associé à la contrainte de concentration. Il est nul si la contrainte n'est pas atteinte, positif dans le cas contraire.

À l'optimum les relations suivantes sont réalisées :

$$U'(R_t) = \lambda_t + \varepsilon \mu_t$$

$$\frac{\dot{\mu}_t}{\mu_t} = \rho + \alpha - \frac{\omega_t}{\mu_t}$$

$$\frac{\dot{\lambda}_t}{\lambda_t} = \rho$$

La rente de rareté croît sur ce chemin optimal au taux d'actualisation¹ ρ :

$$\lambda_t = \lambda_0 e^{\rho t}$$

La valeur carbone croît sur ce chemin optimal au taux d'actualisation augmenté du taux d'absorption naturelle de carbone dans l'atmosphère.

$$\mu_t = \mu_0 e^{(\rho + \alpha)t}$$

Source : Centre d'analyse stratégique d'après une présentation de K. Schubert (université Paris 1)

(1) Cette rente est contrainte par le prix de la ressource renouvelable de substitution qui se développe lorsque la rente sur l'énergie fossile atteint le niveau qui déclenche la rentabilité de l'énergie non carbonée de substitution.

3. Les amendements à apporter à la règle de Hotelling

3.1. Les mécanismes d'absorption naturelle du CO₂

Si on considère la seule question de la valeur carbone, on retrouve bien dans la démonstration précédente la règle de Hotelling, au détail près que la prise en compte du mécanisme d'absorption naturelle du CO₂ conduit à se référer à un taux plus élevé que le taux d'actualisation.

Si on considère que le taux d'absorption est faible par rapport au taux d'actualisation, la règle de Hotelling est une bonne approximation. Si on considère au contraire que ce taux d'absorption est important, la règle doit être infléchie. Plus on considère un taux d'actualisation faible, plus la question de l'absorption devient essentielle dans le calcul.

On a supposé en outre dans le modèle précédent que ce taux d'absorption est constant. Cependant, les travaux des climatologues montrent qu'il peut évoluer dans des sens opposés : l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère peut accélérer certains processus naturels de captation du carbone ; l'augmentation de la température peut à l'inverse fragiliser de manière irréversible ces mécanismes complexes¹.

3.2. La prise en compte de l'incertitude

3.2.1. La règle de Hotelling en univers incertain

La « pureté » du résultat précédent, qui fixe un cadre général pour la question de la gestion optimale de ressources non renouvelables en univers certain, doit être amendée pour tenir compte des nombreuses incertitudes qui entourent la lutte contre le changement climatique².

Dès les années 1980, cette question est apparue primordiale et les travaux intègrent les problématiques d'irréversibilité et de valeur de l'information. Ces travaux (notamment l'usage de modèles de contrôle optimal résolu en décision séquentielle) font apparaître une nécessité d'actions précoces plus importantes du fait des incertitudes, en raison de l'irréversibilité des changements climatiques créés par l'inaction³. Dans les approches stochastiques, les hypothèses sur la technologie et sur les dommages sont toujours au cœur des résultats, mais la trajectoire optimale consiste en un compromis acceptable entre des visions différentes, qui assure le maintien des possibilités de réorientation en cas de nouvelles informations (Ha Duong *et al.*, 1994).

La question des incertitudes sur l'effet de serre a plusieurs dimensions : elle concerne aussi bien la croissance économique⁴, les coûts des dommages, le progrès technique que le degré d'engagement des acteurs.

(1) Ce point fait encore l'objet de controverses scientifiques. Nous verrons par la suite que ce taux a des incidences importantes sur les simulations. C'est une des incertitudes qui seront évoquées dans le paragraphe suivant.

(2) Ce type de « complication » est bien connu depuis les années 1970 pour le strict problème de l'énergie, où de nouvelles découvertes de ressources fossiles ou l'arrivée de nouvelles technologies de substitution non épuisables (*backstop*) a un impact important sur le sentier optimal (cf. Dasgupta et Heal, 1974).

(3) On retrouve le même résultat avec des analyses coûts/bénéfices dès lors qu'on a des courbes de dommages présentant des non-linéarités (Ambrosi *et al.*, 2003).

(4) L'incertitude sur la croissance est intégrée dans le choix d'un taux d'actualisation décroissant dans le temps. Voir le rapport Lebègue.

3.2.2. L'incertitude internationale sur le degré d'engagement des pays émetteurs de gaz à effet de serre

La contrainte finale sur les émissions mondiales reste incertaine. Elle dépendra principalement de l'évolution des rapports de force entre grandes puissances dans le cadre des négociations sur le post-2012. Le niveau d'ambition final de la lutte contre le réchauffement climatique traduira la propension plus ou moins grande des principaux pays émetteurs de gaz à effet de serre à s'engager dans une résolution concertée et coopérative de la question climatique. Ce jeu diplomatique aura pour toile de fond une connaissance scientifique en rapide mutation (notamment sur la nature et l'ampleur des dommages), qui pourrait conduire à réviser notre jugement collectif sur le niveau de contrainte pertinent, à la hausse (entrée plus précoce que prévu dans la partie « convexe » de la courbe des dommages) comme à la baisse.

3.2.3. L'incertitude face à l'ampleur du réchauffement et à la gravité de ses conséquences

L'une des grandes inconnues qui alimentent la controverse sur les politiques en matière de changement climatique est bien celle du coût des dommages liés à une augmentation moyenne de la température. Deux attitudes se dégagent :

- celle qui considère que l'ampleur du réchauffement et la gravité de ses conséquences (événements catastrophiques, effets d'emballement, variation à la baisse des processus d'absorption naturelle du carbone) doivent conduire à un effort plus important. Cette attitude conduit à envisager dès aujourd'hui un objectif de réduction ambitieux, et donc à majorer la valeur du carbone ;
- celle qui considère que les progrès de la connaissance peuvent amener à une modération des jugements sur l'apparition des dommages, sur la réalité de la hausse des températures, les technologies disponibles, etc., et qu'il serait dès lors plus raisonnable de ne pas introduire un choc de prix initial trop important. Il serait plus rationnel de transférer l'effort dans le temps pour tirer meilleur parti de l'information future et de privilégier aujourd'hui la croissance, nécessaire pour financer le progrès technique et les nouveaux investissements plus sobres en carbone. Cette attitude conduit à s'engager sur des réductions d'émissions moins ambitieuses et donc une valeur du carbone plus faible.

3.2.4. L'incertitude sur le progrès technique

Le progrès technique est un élément clé de la lutte contre le changement climatique. Les simulations des modèles montrent très clairement la sensibilité des valeurs du carbone aux hypothèses sur l'émergence et la diffusion de nouvelles technologies plus sobres en carbone ou non : le coût et la faisabilité d'un objectif donné de réduction des émissions changent alors radicalement.

Il faut en pratique distinguer deux types d'incertitude sur le progrès technique :

- l'incertitude sur l'innovation qui pourra permettre à des technologies qui n'existent pas, ou seulement à titre très expérimental, d'être déployées à grande échelle d'ici une ou plusieurs décennies. C'est le cas, à des stades différents, des technologies de capture et séquestration du carbone, de la pile à combustible ou de la fusion nucléaire (ITER) ;
- l'incertitude sur la diffusion des technologies qui se rapporte aux nombreux obstacles économiques, institutionnels et comportementaux pouvant freiner la diffusion du progrès technique dans le système économique. Cette seconde incertitude est aussi importante que la première.

Selon le dernier rapport d'évaluation du GIEC (WGIII, 2007), on dispose aujourd'hui d'options de réduction des émissions avec des technologies aujourd'hui matures (énergies renouvelables, gains d'efficacité, etc.) pour se placer sur des trajectoires de stabilisation à 450 ou 550 ppme. Cette incertitude rappelle les débats sur l'existence ou non de larges potentiels « sans-regrets » ou « à coûts négatifs » (GIEC, 1995, 2001) : il est possible en effet d'identifier un certain nombre d'évolutions technologiques qui présentent un bilan actualisé positif, comme en témoignent les courbes sectorielles de coût d'abattement calculées par McKinsey (cf. Graphique n° 7).

Le problème posé pour les deux prochaines décennies (jusqu'en 2030) est moins l'incertitude sur les technologies disponibles que celle portant sur la mobilisation des potentiels de réduction identifiés par les experts, et sur la levée des freins à la diffusion des technologies existantes : accès à l'information, accès au crédit, coûts de transaction, etc.

Au-delà de 2030, en revanche, la poursuite de la « décarbonisation » des économies est conditionnée par l'arrivée à maturité de technologies aujourd'hui encore incertaines, tels la capture et séquestration du CO₂ ou les véhicules électriques. Ces incertitudes sur le progrès technique ont toujours été au centre de controverses sur les politiques de réduction des émissions, sur le tempo de l'action et, plus récemment, sur les outils de politique publique. La vision que l'on a des mécanismes de progrès technique est déterminante :

- on peut considérer que le progrès technique est exogène. Dans ce cas, plus on est optimiste sur le progrès technique à venir, plus il est économiquement rationnel de reporter une partie des efforts de réduction, lorsque l'arrivée à maturité des technologies faiblement émettrices permettra des réductions à faible coût ;
- on peut au contraire considérer que le progrès technique résulte d'un ensemble de mécanismes *endogènes* à l'économie et d'incitations, et non d'une « manne qui tombe du ciel ». L'étude des déterminants endogènes de ce progrès technique insiste sur trois mécanismes centraux :
 - l'apprentissage par la pratique (*learning-by-doing*), lorsqu'une augmentation des investissements dans une technologie innovante induit progressivement une baisse des coûts de cette technologie ;
 - l'innovation induite par les efforts de R & D (*learning-by-searching*) ;
 - les effets de diffusion (*spillovers*) qui permettent à l'ensemble de l'économie mondiale de profiter d'innovations, même si celles-ci ont été réalisées dans un cadre restreint.

L'idée d'un apprentissage endogène (par la pratique ou par la R & D) modifie profondément le débat sur le tempo de l'action, puisque la question pertinente n'est plus de savoir si l'on doit être optimiste ou pessimiste sur le progrès technique, mais de prendre en compte le fait qu'une action précoce peut induire l'arrivée plus rapide de nouvelles technologies peu émettrices. Cette considération ouvre la voie à un débat sur les instruments les plus adaptés pour cette action précoce, certains considérant qu'il faut mettre l'accent sur les efforts de R & D dans le domaine énergétique, tandis que d'autres insistent sur l'importance du signal-prix et des gains d'apprentissage par la pratique, plaidant pour des objectifs de réductions immédiats. En fait, il est probable que la solution optimale soit une combinaison des deux (GIEC, WGIII, 2007).

Lorsqu'on incorpore ces considérations de progrès technique dans l'analyse, il faut noter que l'incertitude sur le *coût marginal* d'abattement futur conduit à modifier la chronique des efforts de réduction d'émissions :

- l'optimisme sur l'émergence de technologies de rupture (captage du carbone, génération IV dans le nucléaire, hydrogène, etc.) conduit à préconiser un abaissement de la marche initiale ;
- la prise en compte du progrès technique induit amène à préconiser une élévation de la marche initiale, compensée par une diminution du taux de croissance de la valeur du carbone.

3.2.5. *Ce que dit l'analyse économique sur la prise en compte de l'incertitude*

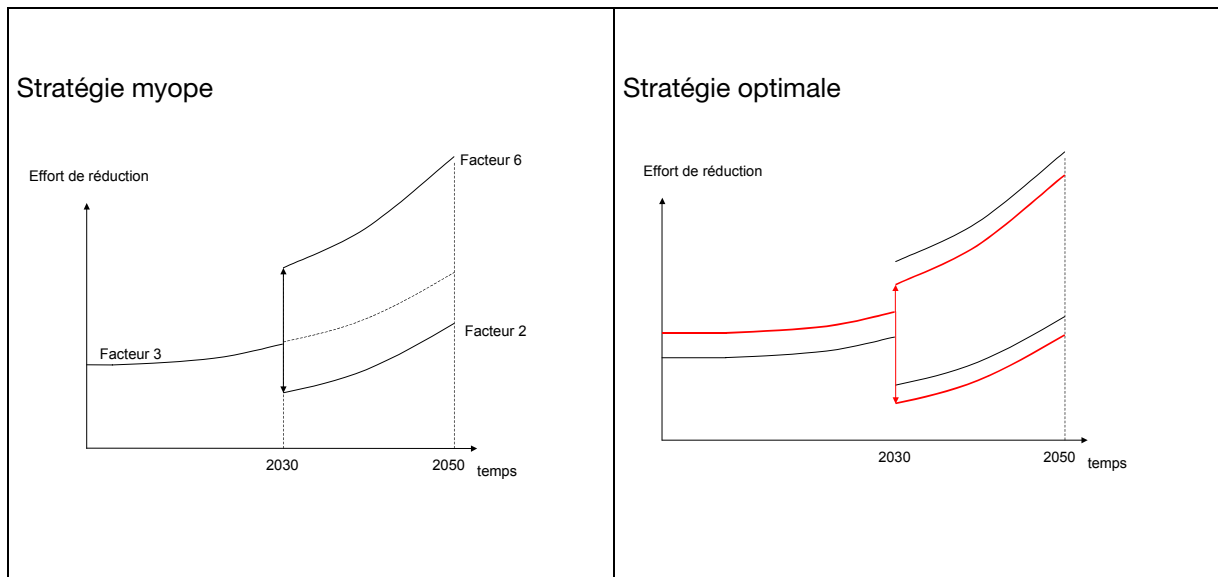
La plupart des modèles d'évaluation, dont les trois mobilisés par la commission, ainsi que le modèle de contrôle optimal élaboré, font abstraction des incertitudes importantes rappelées ci-dessus. Il faut donc adapter leurs résultats. On peut dégager les intuitions suivantes de ce que dit l'économie de l'environnement sur la prise en compte de l'incertitude sur le sentier de réduction des émissions et sur la valeur carbone :

- le rôle des irréversibilités. Dans un monde où l'on anticipe que les incertitudes environnementales, technologiques ou politiques vont se résorber rapidement, il y a une valeur d'option à engager des actions qui laissent les plus grands degrés de flexibilité à l'avenir. Néanmoins, cette observation générale ne donne pas d'indications claires concernant le signe de l'impact de l'incertitude sur l'importance de l'effort initial. Dans le cadre du changement climatique, l'irréversibilité environnementale (difficulté de récupération du CO₂ émis) milite en faveur d'un effort initial plus important. À l'inverse, l'irréversibilité du capital investi (difficulté de récupération des équipements installés) milite en faveur d'un effort initial faible ;
- le rôle de l'aversion au risque. Les incertitudes environnementales, technologiques et politiques constituent un risque financier que portent les générations futures. Augmenter l'effort initial de réduction d'émissions constitue pour elles une réduction du risque qu'il faut valoriser, en augmentant la valeur initiale du carbone ;
- le rôle de la prudence. À l'instar d'un ménage prudent accumulant une épargne de précaution quand ses revenus futurs deviennent plus incertains, il est 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. Cette stratégie a pour avantage essentiel de réduire l'impact d'une mauvaise nouvelle à l'avenir qui, si ce scénario se réalisait, nécessiterait un effort massif d'abattement, aux conséquences économiques et sociales importantes.

Pour illustrer les implications pratiques de ces principes, considérons une incertitude de nature politique sur l'objectif de réduction des émissions, liée à un risque sur la stabilité des accords internationaux post-Kyoto ou à un risque technologique. Supposons par exemple qu'on anticipe aujourd'hui que les objectifs ont autant de chances d'être révisés à l'horizon 2030 à un niveau très contraignant (par exemple facteur 6) ou au contraire à un niveau peu contraignant (par exemple facteur 2). Si on fait abstraction de cette incertitude en prenant un scénario moyen¹ (facteur 3) tout en suivant le principe d'une croissance de la valeur carbone au taux d'actualisation, on obtient une stratégie myope qui n'est pas socialement désirable. Observons en particulier qu'elle implique un effort supplémentaire de réduction particulièrement violent en 2030 si le scénario « facteur 6 » se réalise. Cet effort initial supplémentaire aura été en revanche « inutile » si le scénario « facteur 2 » se réalise, cet effet ne compensant que partiellement le premier. En augmentant l'effort entre aujourd'hui et 2030, on offre une assurance et une épargne de précaution, qui permet d'aborder le risque de révision des engagements en 2030 dans une situation plus favorable.

(1) Dans ce cas, si les facteurs 2 et 6 sont équiprobables (probabilité = 0.5), le facteur 3 moyen équivalent est obtenu sur la base de : $0,5 \cdot (1/6) + 0,5 \cdot (1/2) = 1/3$.

Graphique n° 14 : Stratégie optimale en univers incertain



Source : Centre d'analyse stratégique d'après présentation de C. Gollier (Toulouse School of Economics)

Globalement, la prise en compte de l'incertitude dans les modèles nécessite d'augmenter la valeur initiale du carbone. Elle induit donc aussi une modification de la règle de la croissance de la valeur carbone au taux d'actualisation :

- d'une part, elle rend la valeur carbone future incertaine, c'est-à-dire dépendante d'informations futures ;
- d'autre part, en augmentant l'effort initial, elle réduit le taux de croissance *espéré* de la valeur carbone.

3.3. Les enseignements à tirer pour l'élaboration du référentiel carbone

Au total, trois principes doivent guider l'évolution de la valeur du carbone dans le temps :

- premier principe : la règle de Hotelling constitue une référence pertinente dans une approche coûts/efficacité. Cette règle à une double portée :
 - elle montre que l'actualisation « n'écrase » pas la valeur d'une ressource rare si celle-ci voit son prix relatif croître dans le temps ;
 - elle exprime que l'on est indifférent, au voisinage de la trajectoire actualisée, à déplacer un effort marginal d'abattement d'une période à une autre ;
- deuxième principe : les spécificités du changement climatique conduisent à formuler deux types d'amendements à la règle de Hotelling :
 - l'absorption naturelle du CO₂ milite en faveur d'un rehaussement du taux de croissance de la valeur par rapport au taux d'actualisation ;
 - l'incertitude conduit au contraire à un rehaussement de la valeur initiale du carbone et à une baisse du taux d'actualisation, en application du principe de précaution. Comme on le verra dans la présentation du compromis final, le pragmatisme peut imposer d'envisager de lisser la marche initiale sur plusieurs années.

- la commission considère, en l'état des informations à sa disposition sur l'importance quantitative de ces deux éléments, qu'ils tendent à se compenser, ou en tout cas que leur solde net reste du second ordre.
- troisième principe : la règle de Hotelling est une règle de gestion d'un « budget carbone » de long terme. Sur un horizon plus court, elle doit être appliquée en tenant compte des objectifs intermédiaires définis au niveau européen (- 20 % ou - 30 % en 2020, puis « facteur 4 » en 2050).

Chapitre 5

Les scénarios de modélisation

Les points développés précédemment constituent le socle sur lequel se construit ce cinquième chapitre, qui explicite le processus d'élaboration de la valeur tutélaire du carbone en s'appuyant sur un exercice de simulation.

La commission présidée par Marcel Boiteux avait clairement souligné l'intérêt des modèles et utilisé assez directement les travaux engagés dans le cadre de l'exercice de prospective du secteur énergétique 2010-2020 présidé par Pierre Boisson¹, mais elle n'avait pas engagé d'exercice de simulation spécifique.

La présente commission a jugé pour sa part indispensable d'engager un tel exercice, dans l'esprit de ce qui a été mis en œuvre par l'administration américaine ces dernières années dans le cadre du *Climate Change Science Program* (CCSP)². Pour ne pas être « prisonnière » des résultats de l'un ou l'autre des modèles, elle en a sélectionné trois, aux logiques de construction très différentes.

Les modèles permettent de calculer le profil de valeur du carbone nécessaire pour respecter une enveloppe d'émissions donnée. Les modèles sont contraints par des points de passage sur les émissions en 2020 et 2050, conformément aux objectifs européens ; en ce sens, ils calculent des variables duales d'une trajectoire donnée à l'avance.

1. Le rôle de la modélisation³

De nombreux modèles économiques permettent de simuler l'évolution du système énergétique et des émissions de gaz à effet de serre qui en découlent, ainsi que leurs interactions avec le système économique. Ils se différencient par leur approche plus ou moins globale de l'économie, par leur couverture géographique (nationale, régionale ou mondiale), par leur horizon temporel, par la prise en compte des technologies (identification explicite ou non de technologies alternatives à celles fondées sur la consommation d'énergies fossiles). C'est pourquoi il est utile de les comparer, voire de les faire « dialoguer », chacun apportant un éclairage différent.

(1) Commissariat général du Plan, *Énergie 2010-2020. Les chemins d'une croissance sobre*, Rapport du groupe présidé par Pierre Boisson, Paris, La Documentation française, 1998.

(2) On ne décrit pas ici l'ensemble de ce travail tout à fait remarquable qui montre comment les exercices de modélisation peuvent servir à une réflexion prospective. Les principaux résultats obtenus dans cet exercice sont décrits dans le chapitre sur les valeurs du carbone. Le détail de ce programme est consultable à l'adresse suivante : <http://www.climatescience.gov>.

(3) Cette typologie a été présentée en séance par Renaud Crassous. Voir Crassous-Doerfler R., *La Modélisation prospective de long terme au service de l'évaluation des politiques climatiques et énergétiques*, thèse de doctorat en économie, Paris (soutenance prévue en septembre 2008). On peut également lire avec profit un document plus ancien : Commissariat général du Plan, *Effet de serre : Modélisation économique et décision publique*, Rapport du groupe présidé par Jean-Noël Giraud, Paris, La Documentation française, 2001 (voir l'annexe « Typologie de modèles », p. 139-144).

On distingue traditionnellement deux grandes catégories : les modèles technico-économiques et les modèles macroéconomiques.

1.1. Les modèles technico-économiques

Ils s'attachent à représenter l'évolution du système énergétique. Ils se fondent sur deux types de modélisation :

- les modèles de simulation de tout ou partie du système énergétique. Ils représentent les comportements des agents économiques (consommateurs et/ou producteurs), les choix d'investissements et l'équilibre des marchés énergétiques. Ces modèles permettent une description précise et physique des technologies, des stocks et des flux d'énergie, ainsi que des équipements. Ils n'incorporent en revanche qu'une représentation globale et exogène du reste de l'économie, sous la forme d'une trajectoire de PIB prescrite par le modélisateur. Dans la plupart de ces modèles, la valeur du carbone induit une bifurcation de la trajectoire d'émissions en modifiant les termes de la compétition entre types d'énergies, *via* les choix d'investissements, les gains d'efficacité et la direction du progrès technique. En France, existent le modèle MEDEE-ME (ENERDATA), un modèle très désagrégé qui concerne uniquement la *demande* finale d'énergie au niveau national, et le modèle POLES (LEPII), un modèle mondial régionalisé de simulation du système énergétique en équilibre partiel. Au niveau mondial, cette catégorie inclut par exemple les modèles PRIMES, CIMS, WEM, TIMER ;
- les modèles d'optimisation du système énergétique. Ils calculent de manière normative les investissements optimaux pour minimiser le coût complet de la fourniture de services énergétiques finaux donnés. Ces modèles comportent une description complète et très désagrégée des technologies de production et de transformation énergétiques. Lorsqu'ils sont soumis à une contrainte, tel un plafond d'émissions de gaz à effet de serre, ils calculent la réorientation optimale du système énergétique qui satisfasse à la fois la demande exogène de services énergétiques et la contrainte d'émissions. Les plus connus de ces modèles sont ceux de la famille MARKAL, ou MESSAGE (The International Institute for Applied Systems Analysis). En France, le modèle EFOM avait été développé dans les années 1970 et le modèle MARKAL France est actuellement développé par le Centre de mathématiques appliquées de l'École des Mines de Paris. Ces modèles calculent uniquement une évaluation des coûts techniques de réduction des émissions.

1.2. Les modèles macroéconomiques

Ils se caractérisent par une représentation globale de l'économie et une représentation plus agrégée du système énergétique lui-même. Cet ensemble de modèles se décline selon trois catégories :

- les modèles d'équilibre général calculables permettent la simulation des interactions intersectorielles et de la propagation des effets des politiques de réduction des émissions dans l'ensemble des économies. Ils s'appuient en général sur une représentation walrasienne de l'économie. Ils décrivent explicitement les préférences des consommateurs et les possibilités techniques des secteurs à travers des agents représentatifs, avec de nombreuses variantes concernant le mode d'anticipations des agents, les hypothèses d'optimalité des comportements, la désagrégation sectorielle et régionale. Ces modèles fournissent une évaluation du coût macroéconomique des politiques de réduction, sous la forme de variations de PIB ou de coûts en bien-être, une fois pris en compte l'ensemble des effets de système dans l'économie. En France, les modèles GEMINI-E3 et LINKAGE-ENV (successeur de GREEN à l'OCDE) entrent dans cette catégorie. Dans le monde, parmi les plus connus de cette catégorie, on compte les modèles EPPA, Worldscan, SGM, WIAGEM et AMIGA ;

- les modèles intégrés de contrôle optimal reposent sur une représentation très agrégée de l'économie et une représentation compacte du cycle du carbone et, éventuellement, du climat. Ils sont utilisés pour calculer les trajectoires optimales de réduction des émissions, soit dans une logique coûts/avantages (en effectuant un arbitrage inter-temporel entre coûts de réduction et coûts du changement climatique non évité), soit dans une logique coûts/bénéfices (en optimisant le profil temporel de l'action pour respecter un plafond donné de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère). La description des systèmes techniques passe par des fonctions agrégées de coûts marginaux d'abattement, calibrées sur le comportement des modèles technico-économiques ou des modèles d'équilibre général présentés ci-dessus. Le plus connu est le modèle DICE de W. Nordhaus et sa version régionalisée RICE. On compte également MIND, ENTICE, RESPONSE.
- Les modèles macro-économétriques s'appuient sur un schéma néo-keynésien d'ajustement à court terme par les quantités qui prolongent les comportements passés. La demande finale de biens est le principal déterminant du fonctionnement de l'économie. Du fait des délais d'ajustement des quantités, ces modèles admettent des déséquilibres temporaires : sous-utilisation des capacités de production, chômage conjoncturel. Ces modèles (par exemple HERMES, E3MG, NEMESIS pour l'effet de serre), dont l'horizon temporel est de court et moyen termes (entre 5 et 20 ans), peuvent s'adapter à l'analyse de politiques environnementales d'ampleur modérée et à faible impact sur les processus de production. Outre les variables macroéconomiques habituelles (croissance, emploi, prix, coûts), ces modèles déduisent des activités sectorielles les émissions de gaz à effet de serre. Les modèles macro-économétriques, enracinés dans l'analyse économétrique de séries chronologiques longues, sont aujourd'hui très peu utilisés sur la scène internationale pour produire des scénarios de réduction à long terme.

Au-delà de ces différentes classes de modèles, les dix dernières années ont vu le développement généralisé des modèles dits « hybrides », c'est-à-dire construits sur le couplage de modèles de types différents : par exemple le couplage d'un modèle technico-économique avec un modèle de contrôle optimal (MERGE, MARKAL-MACRO) ou d'un modèle d'équilibre général avec des modèles sectoriels physiques détaillés (SGM, IMACLIM-R). Ces hybridations ont pour but de pallier les faiblesses respectives des différents types de modèles et d'offrir des outils plus complets pour la simulation des politiques de réduction.

2. Les exercices de simulation

2.1. Les simulations d'un modèle théorique simplifié

La commission s'est appuyée sur un modèle simplifié de « contrôle optimal » proche du type de celui utilisé par Nordhaus (DICE). En posant un petit nombre d'hypothèses, il est possible de calibrer notamment la valeur initiale du carbone qui constitue dans la démarche dite Hotelling le point le plus attendu mais aussi le plus difficile à préciser.

Pour réaliser cette simulation¹ :

- le modèle suppose de pouvoir préciser une fonction d'utilité déterminée¹ dans laquelle apparaissent deux paramètres b et c . Ce dernier joue un rôle théorique important puisqu'il

(1) Voir plus haut le détail du modèle et les principales conclusions qui ont été largement présentées et discutées en commission.

s'agit de la valeur de long terme de la ressource fossile qui permettrait aux substituts renouvelables non polluants de faire disparaître toute consommation de la ressource fossile (on parle de *choke price*² et de *backstop technology*) ;

- le modèle n'introduit pas explicitement de progrès technique, mais l'existence de ce *choke price* suppose implicitement qu'il existera une ressource de substitution.

Le calibrage du modèle

Le monde émet actuellement environ 7 GtC chaque année et dispose de 300 GtC sous forme de pétrole (dont 50 % sont récupérables), 300 GtC sous forme de gaz (dont 80 % sont récupérables) et 3 000 Gt de charbon. On suppose dans le scénario de base proposé ici que ce total récupérable est de $S_0 = 3\,000$ GtC.

Il y a actuellement dans l'atmosphère environ 800 GtC et la concentration est de $M_0 = 380$ ppm CO_2 . On peut en déduire qu'émettre 1 GtC augmente la concentration de $380/800 = 0,475$ ppm, d'où le coefficient d'émission $\varepsilon = 0,475$.

Les puits de carbone sont actuellement de 3 à 4 GtC/an. Le coefficient d'absorption naturelle est donc de $3/800$ à $4/800$, c'est-à-dire de 0,375 % à 0,5 %. On peut retenir un taux d'absorption naturelle $\alpha = 0,4$ %.

Le taux d'actualisation est pris à $\rho = 4$ %.

Le rapport b/c (les deux paramètres de la fonction d'utilité, c étant le *choke price*) permet de déterminer entièrement les trajectoires optimales d'extraction, d'évolution des stocks et de valeur relative de la rente de rareté λ/c et du carbone μ/c . Pour que R_0 (consommation d'énergies fossiles) corresponde à ce qu'on observe aujourd'hui (7 GtC) on retient : $b/c = 0,135$.

Les principaux résultats de ce calibrage sont résumés dans le tableau n° 15 : la rente de rareté initiale (λ_0) relative aux énergies fossiles est proche de zéro en raison de l'hypothèse d'abondance des ressources fossiles. La valeur du carbone initiale (μ_0) est de 8 % du *choke price*. Cette valeur croît (dans ce jeu d'hypothèses) pendant 58 ans, date (T_1) à laquelle le plafond de concentration de carbone dans l'atmosphère est atteint. Elle se stabilise ensuite à 110 % du *choke price*, pour redescendre à zéro à un horizon très lointain, quand le stock de ressources fossiles restant devient suffisamment faible.

Tableau n° 15 : Résultats pour le scénario de base

b/c	T_1	λ_0/c	μ_0/c
0,135	58	~ 0	8 %

Source : d'après Katheline Schubert, document de travail

Il est possible de tester la sensibilité des principaux résultats en faisant varier le taux d'actualisation, le stock initial de ressources fossiles et le taux d'absorption naturel du

(1) La fonction d'utilité (quadratique) retenue est de la forme : $u(R) = cR - \frac{b}{2}R^2$, $c, b > 0$, $R \leq \frac{2c}{b}$

(2) C'est le prix le plus bas pour lequel la demande est nulle ou encore le prix pour lequel apparaît un substitut parfait abondant et non polluant.

carbone, et d'observer l'impact sur la valeur carbone (exprimée en pourcentage du *choke price*, qui se trouve dans la colonne de droite du tableau n° 16).

Tableau n° 16 : résultats pour le scénario de base

Test		b/c	T ₁	λ ₀ /c	μ ₀ /c (en %)
Taux actualisation	ρ = 3 %	0,132	61	~ 0	13,2
	ρ = 5 %	0,137	56	~ 0	5,0
Réserves initiales des énergies fossiles	S ₀ = 2 000 GtC	0,135	58	~ 0	8,0
	S ₀ = 1 000 GtC	0,135	58	~ 0	8,0
	S ₀ = 500 GtC	0,135	58	0,015	5,2
Coefficient d'absorption naturelle du CO ₂	α = 0,2 %.	0,123	43	~ 0	26,8
	α = 0,1 %.	0,114	38	~ 0	39,9

Source : Katheline Schubert, document de travail

Conformément aux résultats théoriques présentés dans le chapitre précédent :

- le niveau initial de la valeur du carbone est d'autant plus faible que le taux d'actualisation (et donc le taux de croissance de la valeur du carbone) est élevé ;
- plus le stock de ressources fossiles exploitables est faible, plus la rente de rareté initiale est élevée et la valeur initiale du carbone est faible ;
- plus le taux d'absorption naturelle est faible, plus la valeur initiale du carbone est élevée. Elle est multipliée par 3 quand α est divisé par 2. En effet, quand α est très faible, l'absorption naturelle contribue très peu à réduire la formation du stock de carbone atmosphérique.

Si on considère essentiellement la marche initiale (la valeur du carbone en début de période), le calibrage retenu plus haut donne les ordres de grandeur suivants :

- la valeur initiale du carbone μ₀/c est, sous ces hypothèses, de l'ordre de 8 % du *choke price*. Cette valeur relative du carbone croîtrait ensuite pendant environ 60 ans (T₁) avant de se stabiliser autour de 110 % du *choke price* pour décroître enfin vers 0. Si l'énergie fossile considérée ici était entièrement du pétrole, et si l'on supposait un *choke price* de c = 200 euros/baril, la valeur initiale d'une tonne de CO₂ serait de l'ordre de 40 euros. Un taux d'actualisation de 3 % au lieu de 4 % conduit à une valeur initiale de 70 euros, un taux plus élevé (5 %) à 26 euros ;
- si on considère un taux d'absorption plus faible de 0,2 %, on obtient une valeur initiale de 140 euros la tonne de CO₂, et plus de 200 euros avec α = 0,1. On voit également que le délai à partir duquel la valeur carbone commencerait à décroître se réduirait, passant dans cette même hypothèse de 60 ans à 43 ans puis à 38 ans.

2.2. L'exercice de modélisation

2.2.1. Les modèles retenus

Les simulations ont été établies sur la base d'un travail collectif mené avec trois équipes de chercheurs. Les modèles engagés dans cet exercice recouvrent plusieurs types de modèles présentés plus haut : le modèle technico-économique sectoriel POLES, le modèle d'équilibre général GEMINI-E3, le modèle hybride IMACLIM-R. Le tableau n° 17 en fournit les principales caractéristiques. Une présentation plus détaillée de chacune des modélisations se trouve en annexe dans le tome 2.

Tableau n° 17 : Modèles utilisés par la commission

Équipe	Modèle	Famille	Caractéristiques
LEPII	POLES	Modèle d'équilibre partiel du système énergétique	Par région (47), simulation de la demande énergétique, des choix technologiques et de l'équilibre des marchés énergétiques
C-ORDEE & MEDAD	GEMINI E3	Modèle d'équilibre général calculable de l'économie mondiale	Par région (14) et par secteur (18), description des ressources : production (travail, énergie, capital, etc.)/ importations et emplois : consommations, exportations, investissements. Calcul des échanges internationaux de biens et de services et des émissions de GES des activités économiques
CIREC	IMACLIM-R	Modèle d'équilibre général hybride	Description de la croissance comme succession d'équilibres généraux annuels en prix et en quantités physiques (12 régions/12 secteurs), reliés par des modules dynamiques technico-économiques sectoriels (dynamique macroéconomique, évolution des styles de développement, progrès technique). Émissions : CO ₂ .

Source : LEPII, C-ORDEE, CIREC

2.3. Les trois scénarios polaires étudiés

La commission a choisi d'étudier trois scénarios de contraintes d'émissions suffisamment différents pour tester la sensibilité de la valeur carbone aux hypothèses sur le niveau de réduction d'émissions au niveau mondial et sur le degré de flexibilité pour tirer parti des mécanismes de projet du protocole de Kyoto (échanges de quotas entre États, MDP, MOC).

2.3.1. Un scénario « Europe seule »

Ce scénario suppose qu'aucune politique de grande ampleur n'est mise en oeuvre hors de l'Europe. Celle-ci poursuit de manière isolée les objectifs annoncés dans les décisions du Conseil des 8-9 mars 2007 : elle vise un objectif de réduction de 20 % en 2020 par rapport aux émissions de 1990, puis de 60 % en 2050. Le taux de décroissance des émissions de l'Europe impliqué par le profil est de - 1,5 % par an entre 2010 et 2020 ; ce taux atteint entre - 2 % et - 2,5 % par an entre 2030 et 2050.

Dans ce scénario, il n'y a aucun mécanisme de flexibilité et la valeur carbone simulée par les modèles est propre à l'Europe. Le reste du monde ne s'engage pas dans la lutte contre le changement climatique, si bien que les prix internationaux de l'énergie restent élevés.

2.3.2. Un scénario mixte : « des efforts coordonnés au niveau international »

Contrairement au scénario précédent, le contexte international est coopératif et l'Europe s'inscrit alors sur un profil de réduction plus exigeant : - 30 % en 2020 par rapport à 1990 et - 80 % en 2050, en usant pour ce faire des dispositifs de flexibilité internationaux.

Le profil d'émissions mondiales simulé correspond à un scénario de stabilisation à 550 ppme¹. L'objectif de ne pas dépasser une augmentation de 2° C n'est pas atteint. Dans ce scénario mondial on suppose un haut niveau de flexibilité et la valeur du carbone applicable à l'Europe est une valeur mondiale.

2.3.3. Un scénario mondial volontariste

Il s'agit d'un scénario d'actions coordonnées au plan mondial, avec une gouvernance forte conduisant à retenir des objectifs conformes aux ambitions climatiques actuelles de l'Union, c'est-à-dire visant à limiter à 2° C l'augmentation moyenne de température par rapport à la situation préindustrielle. C'est un scénario de type « stabilisation des émissions à 400 ppm CO₂, ou 450 tous gaz² ». Dans ce cas, les émissions mondiales, après avoir crû de presque 3 % par an depuis 2000, doivent se stabiliser avant 2020, puis décroître de 2 %/an après 2020. La décroissance atteint - 4 % à - 5 % par an entre 2040 et 2050. On suppose, contrairement au scénario « Europe seule », un haut niveau de flexibilité. La valeur du carbone est donc unique à l'échelle mondiale et applicable *de facto* à l'Europe. L'Europe peut donc recourir aux mécanismes de flexibilité pour satisfaire ses engagements (c'est-à-dire réduire ses émissions en Europe même ou à l'extérieur sur la base de financements de projets ou d'achats de permis).

Il est possible de résumer ces trois scénarios dans le tableau suivant :

Tableau n° 18 : Les trois scénarios de la commission

Scénario de contraintes sur les émissions de GES	2020	2050	Accord international
	Objectif de réduction de l'Europe (base 1990)		
Scénario Europe seule	- 20 %	- 60 %	Aucun (valeur du carbone propre à l'Europe)
Scénario coordonné	- 30 %	- 80 %	Objectif 550 ppme (valeur du carbone unique à l'échelle mondiale)
Scénario mondial volontariste			Objectif 450 ppme (valeur du carbone unique à l'échelle mondiale)

Source : Centre d'analyse stratégique

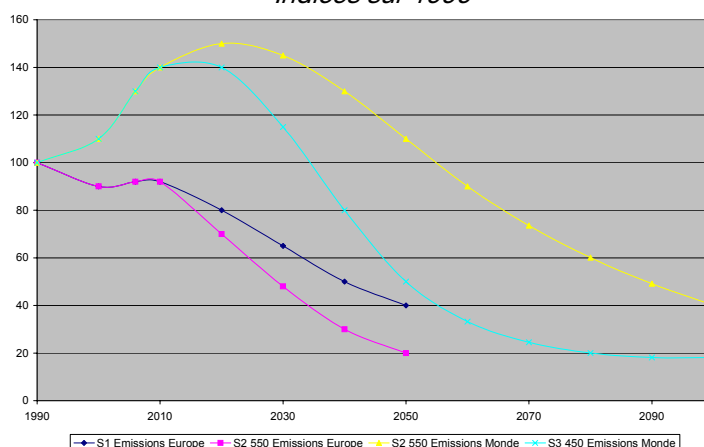
Les profils d'émissions retenus dans les différents scénarios tiennent compte des dernières tendances constatées pour l'évolution des émissions de carbone, et des évaluations réalisées par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) pour les autres gaz à effet de serre. Les profils d'émissions sont fondés sur les synthèses établies dans le rapport du Groupe III du GIEC³ (les profils s'entendent « tous gaz à effet de serre »).

(1) Type III selon la typologie du GIEC.

(2) Conforme au Type I du tableau du Groupe III du GIEC.

(3) Le tableau de synthèse est présenté dans la première partie du rapport. Il permet d'établir une relation entre les niveaux de températures, les niveaux de concentration de CO₂ et autres gaz à effet de serre, les émissions à ne pas dépasser pour respecter les contraintes de températures, etc.

Graphique n° 15 : Profils d'émissions retenus dans les trois scénarios de contrainte
Indicés sur 1990



Source : Centre d'analyse stratégique à partir des données LEPII issues des travaux du GIEC

2.4. La construction du scénario de référence

Pour établir une base de discussion cohérente sur les résultats de ces simulations, un jeu d'hypothèses macroéconomiques identiques a été retenu. La commission n'a pas souhaité pour autant rechercher une concordance exacte des scénarios de référence des modèles, au risque d'introduire des incohérences entre certaines des hypothèses propres à chaque modèle.

Le scénario de référence de cet exercice est fondé pour les grandes variables (PIB, prix de l'énergie, etc.) sur le scénario de l'AIE de 2007 (*World Energy Outlook*). Pour la croissance économique, le groupe a retenu les projections de l'AIE, soit un taux de croissance de l'ordre de 2 % à 3 % par an pour les pays développés et de 4 % à 5 % par an pour les pays émergents. Au-delà de 2030, il a été décidé de prolonger les hypothèses du scénario de référence de l'AIE. Ces hypothèses sont cohérentes avec d'autres projections tendancielles du CEPII et de la Banque mondiale. Pour les hypothèses technologiques, le cadrage retenu est celui de l'ETP (*Energy Technology Perspectives 2006*).

Les prix des énergies sont des variables endogènes, calculées dans les modèles. Les dynamiques de prix des scénarios de référence de l'AIE servent de points de repère.

Tableau n° 19 : Les prix des énergies fossiles en dollars 2006

Hypothèses par période		
2008-2015	2015-2030	2030-2050 ¹
Pétrole (\$/b)		
62-57	57-62	60
Gaz naturel (\$/Mbtu)		
7,3-6,6	6,6-7,3	8
Charbon (\$/t)		
63-57	57-61	60

Source : AIE pour 2015-2030

(1) Au-delà de 2030, la commission prolonge les tendances de l'AIE.

2.5. Les principaux résultats des simulations

2.5.1. Les résultats par scénario et par modèle

Le tableau n° 20 récapitule l'ensemble des valeurs produites par les modèles aux différents horizons, pour chacun des trois scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre envisagés, et les situe par rapport à la valeur tutélaire actuelle (valeur dite Boiteux). Pour chacune de ces valeurs, le tableau précise le prix des hydrocarbures (exprimé en dollars par baril) associé dans les modèles à ces différentes simulations.

Le lecteur est invité à se reporter aux rapports des différentes équipes présentant précisément la spécificité des modèles, et l'ensemble des résultats de ces diverses simulations.

Tableau n° 20 : Récapitulation des valeurs carbone (2008) des différents modèles par date et par scénario (€/tCO₂, \$/b)

	Scénario Europe Seule UE €/tCO ₂	Scénario coordonné - 550 ppme €/tCO ₂	Scénario mondial volontariste - 450 ppme €/tCO ₂	Prix pétrole \$/b
En 2010				
POLES	10			
GEMINI-E3	1			
IMACLIM-R	45			
Moyenne	19			
Valeur tutélaire Boiteux	32			
En 2020				
POLES	26	9	16	79
GEMINI-E3	25	4	13	57
IMACLIM-R	95	30	100	93
Moyenne	49	14	43	76
Valeur tutélaire Boiteux		43		41
En 2030				
POLES	97	23	57	96
GEMINI-E3	58	10	42	62
IMACLIM-R	150	55	160	94
Moyenne	102	29	86	84
Valeur tutélaire Boiteux		58		50
En 2050				
POLES	319	85	682	130
GEMINI-E3	446	62	339	60
IMACLIM-R	130	60	200	114
Moyenne	298	69	407	101
Valeur tutélaire Boiteux		104		74

Source : modèles POLE, IMACLIM, GEMINI-E3

2.5.2. *Quelques enseignements généraux*

Au-delà de la forte dispersion des valeurs, quelques tendances se dégagent de cet exercice de modélisation.

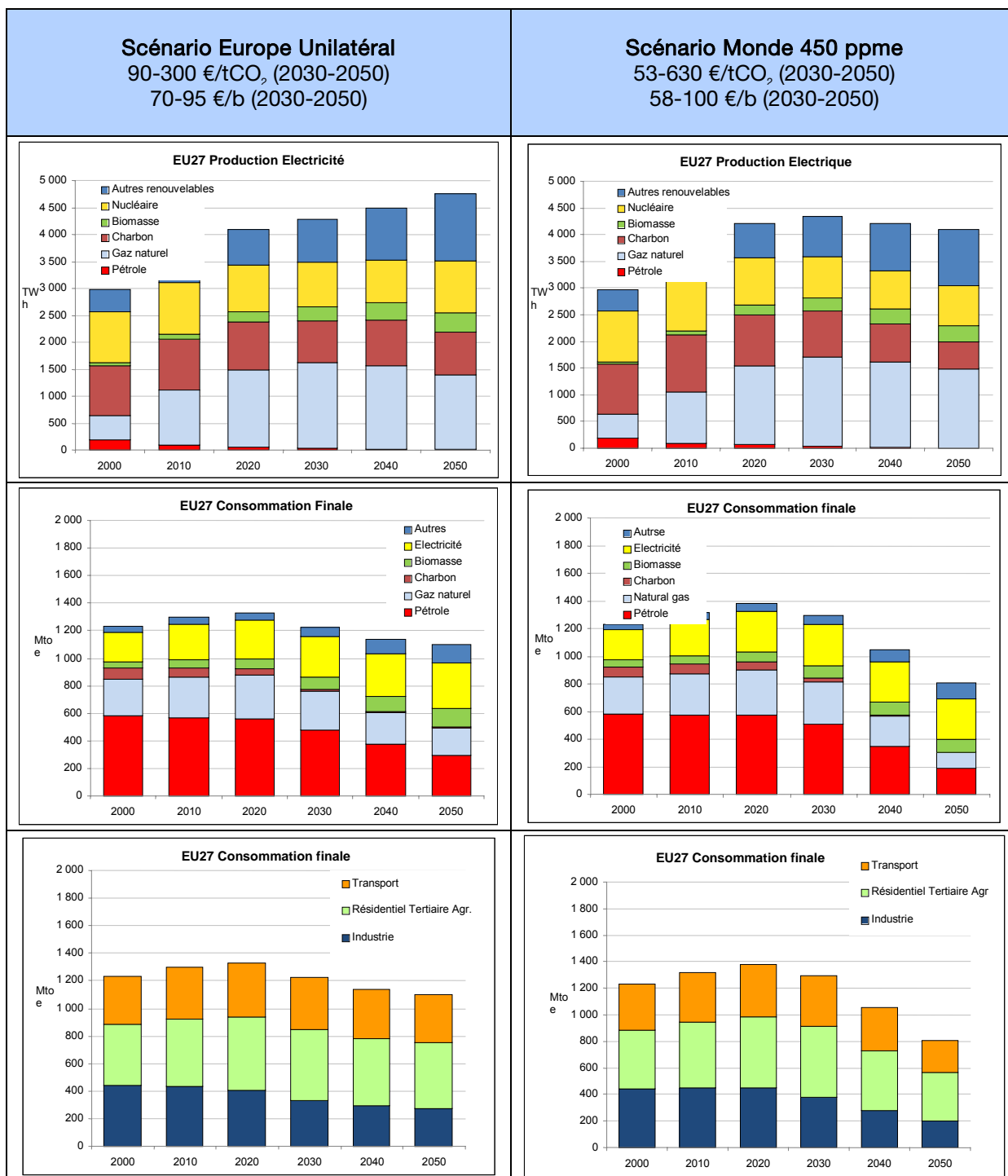
- Tous les modèles présentent un profil croissant de la valeur carbone à l'horizon 2030.
- Au-delà de 2030, les modèles bifurquent : les effets de retour favorables du progrès technique conduisent le modèle IMACLIM à générer des valeurs décroissantes à l'horizon 2030-2050, tandis que les deux autres modèles continuent d'afficher une progression de la valeur du carbone. Cette bifurcation reflète des hypothèses différentes sur les conditions du progrès technique :
 - pour les modèles POLES et GEMINI-3, la valeur croissante du carbone favorise le développement progressif de nouvelles technologies et de nouvelles infrastructures plus sobres en carbone, mais cette stimulation reste progressive, si bien que les effets de retour favorables de ces technologies et de ces infrastructures sur la valeur du carbone restent d'ampleur modeste ;
 - pour le modèle IMACLIM, la valeur croît très fortement dans la première période pour diminuer légèrement par la suite. Ce profil « en cloche » a une double origine. En premier lieu, l'inertie de certaines technologies impose un prix plus élevé en début de période pour les enclencher, l'impact du progrès technique induit (effet d'apprentissage induit par les investissements cumulés) limitant ensuite la hausse sur le long terme. En second lieu, la faible sensibilité des agents économiques au prix du carbone au-delà d'une période de 10-20 ans (décisions séquentielles) impose également un signal-prix plus fort en début de période pour déclencher des investissements dont la durée de vie dépasse cet horizon.
- Les résultats sont très sensibles au niveau de l'objectif de réduction poursuivi et à la coordination internationale des efforts :
 - à l'horizon 2030, un scénario 450 ppme génère une valeur du carbone trois fois plus élevée en moyenne qu'un scénario 550 ppme. À l'horizon 2050, l'écart continue de se creuser de manière significative ;
 - un scénario de coopération internationale permet à l'Europe d'atteindre ces objectifs à un coût sensiblement moins élevé que dans un scénario unilatéral.

2.5.3. *Une appréciation des changements technologiques*

Les exercices de modélisations permettent de dessiner par petites touches ce que pourrait être le paysage en Europe en 2030 mis sous une contrainte carbone. On présente quelques exemples clés avec les modèles POLES et IMACLIM.

Sans entrer dans le détail des résultats de ces différentes simulations, les graphiques suivants, tirés de deux simulations du modèle POLES, permettent d'illustrer les changements que provoquerait l'introduction de contraintes d'émissions dans le secteur énergétique. On présente ici l'évolution de quelques indicateurs globaux pour les deux scénarios qui ont été privilégiés dans l'élaboration de la valeur tutélaire du carbone (Europe Unilatéral et Scénario Monde 450 ppme).

Tableau n° 21 : Valeur carbone, réduction des émissions et secteur énergétique



Source : Rapport de synthèse sur les modélisations de POLE

Les simulations permettent de montrer que, sous certaines hypothèses de progrès technique et d'incitations, la satisfaction d'objectifs ambitieux de réduction des émissions reste compatible avec une certaine croissance des services énergétiques dans les secteurs du bâtiment et des transports.

- Dans les deux scénarios, on observe un ralentissement de la croissance de la consommation énergétique puis, au-delà de 2020, une diminution de celle-ci.
- Dans le scénario « Europe seule », l'ensemble des prix des énergies, et notamment ceux du pétrole et du gaz, augmentent fortement. Dans le scénario mondial volontariste, au contraire, le prix sur le marché international du gaz et du pétrole chute fortement à partir de 2030, en raison de la très forte contraction de la demande mondiale d'énergies fossiles.
- Le secteur électrique reste dans les deux cas l'élément central du dispositif de conversion d'énergie et sa part sur le total ne cesse d'augmenter, et ce d'autant plus que la contrainte sur les émissions est forte. La production d'électricité augmente en début de période puis se stabilise après 2030 dans le scénario « Europe seule » et diminue légèrement dans le scénario mondial volontariste. Même dans ce cas, elle reste en 2050 supérieure à celle d'aujourd'hui. Le respect des contraintes d'émissions est permis par un bouquet électrique largement diversifié : sur les 5 000 TWh alors produits en Europe, plus de 1 000 proviennent de l'énergie nucléaire, environ 800 de l'énergie hydraulique (de grande et petite puissance), 400 de la biomasse et 600 des énergies renouvelables intermittentes, éolien et solaire ; dans la production thermique – charbon et gaz – qui subsiste, les centrales sont équipées de dispositifs de capture et stockage du CO₂.
- La baisse de la consommation finale en Europe provient dans le premier scénario essentiellement du secteur industriel. Cependant, lorsque la contrainte se durcit fortement, les consommations du résidentiel-tertiaire commencent à être significativement affectées. Mais la réduction reste compatible avec une augmentation de 30 % des surfaces totales de logement en 2050 : dans le scénario 450 ppme, par exemple, 40 % du parc total est à cette date constitué de bâtiments à très basse consommation d'énergie ou à énergie positive ce qui, compte tenu des constantes de temps de renouvellement du parc, représente un effort considérable dans la construction neuve et la réhabilitation thermique du parc existant.
- De même, le scénario 450 ppme se traduit en fin de période de simulation par des changements très importants dans le secteur des transports. La baisse de plus de 30 % des consommations (par rapport à aujourd'hui) reste compatible avec une augmentation des trafics, de 50 % pour les passagers et de 95 % pour les marchandises. Cela s'explique par trois catégories de facteurs : un développement relativement rapide des transports ferroviaires, une augmentation généralisée de l'efficacité énergétique et le développement de nouveaux types de véhicules automobiles, électriques et à hydrogène, qui représentent en 2050 respectivement 18 % et 47 % du parc total.

Avec IMACLIM, on peut également illustrer l'évolution des modes de vie en 2030 dans le scénario « Europe seule » :

- le consommateur européen ne consomme plus que 78 kWh/m²/an (contre 165 aujourd'hui). Ces 78 kWh sont produits à 40 % par du gaz et à 60 % par de l'électricité (respectivement 43 % et 28 % aujourd'hui). La part du fioul passe en dessous de 5 % dès 2020 (contre 25 % aujourd'hui) ;
- le même consommateur se déplace 40 % de plus qu'aujourd'hui, en y consacrant le même budget-temps, avec 16 000 km par an, mais la nature de ces déplacements change : la part de la voiture baisse, passant de 80 % à 70 % (les déplacements avec ce mode augmentent malgré tout, passant de 8 000 km/an en 2005 à 10 700 en 2030). La consommation moyenne par passager-kilomètre baisse de 25 % (de 4 l/p-km à 3 l/p-km), ce qui est rendu possible par le développement des technologies de voitures hybrides déjà disponibles, l'amélioration du covoiturage et la réduction de la puissance moyenne des véhicules ;

- grâce aux gains d'efficacité, la consommation finale d'électricité augmente seulement de 20 % entre 2005 et 2030. Cette électricité est alors produite avec 25 % de renouvelables (hors hydrauliques, contre 5 % en 2005), 16 % d'hydroélectricité (14 % en 2005), 23 % de nucléaire (22 % en 2005), 34 % de gaz (21 % en 2005), et quasiment plus de fioul ni de charbon (3 % contre 36 % en 2005). Le charbon revient dans la production après 2030, avec l'arrivée à maturité de la capture et séquestration (15 % en 2040 et 30 % en 2050).

Dans le scénario volontariste mondial (450 ppme), les évolutions sont moins prononcées : avec un prix unique du carbone, une partie significative des efforts est réalisée par l'Europe dans les pays en développement.

Chapitre 6

La trajectoire de valeurs du carbone

L'élaboration du référentiel carbone prend en compte les différents éléments explicités dans les chapitres précédents, qu'il s'agisse des valeurs produites par les différentes simulations, des valeurs révélées par le marché ETS, ou des principes économiques de gestion optimale d'une ressource rare. On trouvera dans ce chapitre les principaux éléments qui ont « façonné » le consensus élaboré au sein de la commission et la trajectoire de valeurs de CO₂ recommandée en conséquence. Ce chapitre a également pour objet d'explicitier la manière dont les incertitudes ont été prises en compte, ainsi que la sensibilité des résultats obtenus aux hypothèses relatives aux prix des énergies fossiles.

1. Une concentration de 450 ppme au centre des objectifs considérés

Le scénario 450 ppme est conforme aux engagements politiques pris au niveau français et européen et aux recommandations du GIEC. C'est donc clairement sur la base de cet objectif ambitieux que la commission a défini le référentiel carbone. La déclinaison pratique de cet objectif nécessite cependant de faire un certain nombre d'hypothèses supplémentaires :

- à l'horizon 2020, les objectifs européens de réduction des émissions sont clairement spécifiés. La présente commission a postulé que l'Europe s'engageait de manière unilatérale jusqu'en 2020, tout en œuvrant à la conclusion d'un accord international. Elle serait rejointe à cet horizon dans la mise en oeuvre de l'objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre par l'ensemble des pays développés et par les pays émergents. Elle pourrait alors s'appuyer sur la formation d'un marché mondial du carbone pour atteindre ses objectifs. La trajectoire de la valeur du carbone proposée dans ce rapport entend rendre compte de cette transition à venir d'ici à 2020, entre un schéma d'action unilatérale de l'Europe et l'avènement d'un monde intégré du point de vue des objectifs et des politiques climatiques ;
- si l'Europe était effectivement rejointe par les autres pays développés et par les pays émergents dans la poursuite de l'objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre avant 2020, elle se fixerait alors un objectif plus sévère (- 30 % en 2020), tout en ayant la possibilité de limiter la hausse du coût du programme de réduction par le recours à des quotas, obtenus sur le futur marché mondial du carbone.

Au-delà de 2020-2030, plusieurs difficultés techniques apparaissent par ailleurs, qui conduisent à apprécier avec davantage de recul les simulations des modèles dans leur recherche d'une trajectoire de valeurs du carbone compatibles avec le « facteur 4 » :

- il est de plus en plus difficile de se prononcer sur les évolutions plausibles des technologies, aussi bien au niveau des systèmes de production et de consommation d'énergie qu'au niveau des techniques de stockage du carbone ;
- la fiabilité des modèles à cet horizon est moins assurée, tant en ce qui concerne la description des technologies et des infrastructures disponibles à cet horizon que la prise en compte de leur impact favorable sur les comportements des agents économiques.

2. Les recommandations

2.1. Une valeur en 2030 autour de 100 euros la tonne de CO₂

À l'horizon 2030, les valeurs produites par les modèles dans les scénarios « Europe Unilatéral » et « Monde 450 ppme » sont proches : 100 euros la tonne de CO₂ dans le premier, 86 euros dans le second.

La commission a décidé de recommander une valeur de 100 euros la tonne de CO₂ à l'horizon 2030.

Ce niveau élevé de la valeur carbone reflète d'abord le caractère ambitieux des objectifs européens de réduction des gaz à effet de serre et l'ampleur, qui ne doit pas être sous-estimée, des efforts nécessaires pour les atteindre.

Il s'appuie enfin sur un usage raisonné des modèles sollicités par la commission, en ne postulant pas *a priori* d'ici à 2030 de ruptures technologiques favorables à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

2.2. Une règle de Hotelling calée sur 4 % à partir de 2030

La commission a décidé de retenir une règle de Hotelling pour faire croître la valeur du carbone au-delà de 2030. Cette règle est calée sur 4 %, soit le taux d'actualisation public français recommandé en 2005 par le rapport Lebègue. Ce choix a été retenu par la commission avec une claire conscience des considérations qui pourraient plaider pour un taux d'actualisation différent.

- Plaident pour un taux plus élevé : la prise en compte du mécanisme d'absorption naturelle du CO₂ d'une part, les effets de bouclage macroéconomique d'autre part. On ne peut en effet exclure qu'un scénario 450 ppme appelle des efforts d'investissement supplémentaires d'une importance telle qu'ils poussent à la hausse les taux d'intérêt d'équilibre mondiaux ;
- Plaide pour un taux plus faible : la prise en compte des incertitudes, qui conduirait à retenir une valeur du CO₂ élevée en début de période, associée à un taux de croissance plus faible que le taux d'actualisation.

L'application de la règle de Hotelling, à compter de 2030 et jusqu'en 2050, conduit à un ordre de grandeur de 200 euros, cohérent avec un objectif de 450 ppme, comme en témoigne la fourchette des valeurs produites par les modèles.

Les incertitudes associées à cette valeur de 200 euros sont nombreuses. La commission a choisi de les mettre en évidence par une fourchette :

- la valeur basse est fixée à 150 euros la tonne de CO₂, pouvant refléter l'application d'une règle de Hotelling à 4 % à partir d'une valeur initiale de 32 euros ;
- la valeur haute est fixée à 350 euros la tonne de CO₂ ;
- la fourchette est dissymétrique, les aléas étant orientés à la hausse dans le cadre de la poursuite d'un objectif mondial de 450 ppme.

2.3. Une valeur initiale 2010 à 32 euros la tonne de CO₂

La valeur initiale du carbone doit répondre à plusieurs exigences :

- elle doit donner un signal immédiat crédible tout en permettant au système de s'adapter dans le temps. Rappelons à cet égard que l'investisseur économique rationnel anticipe l'évolution de la valeur carbone dans le temps et ne considère pas uniquement la valeur de début de période ;
- elle doit prendre en compte les signaux provenant des marchés du carbone, même si ceux-ci ne couvrent en Europe que la moitié des émissions de CO₂.

Pour la période de 2010 à 2030, la commission a discuté deux scénarios.

Le premier scénario consiste à appliquer la règle de Hotelling à partir d'une valeur de 100 euros la tonne en 2030, ce qui aurait pour effet de faire « sauter » la valeur 2010 du carbone de 27 euros la tonne (32 euros si on actualise cette valeur 2000 par l'inflation) à 45 euros. Un tel « saut » permettrait d'intégrer deux préoccupations :

- la prise en compte des incertitudes, qui conduirait à retenir une valeur du CO₂ élevée en début de période, associée à un taux de croissance plus faible que le taux d'actualisation ;

- le fait que les dommages varient en fonction de leur date d'émission, si bien que le rythme du changement climatique compte, et pas seulement la concentration finale de gaz à effet de serre.

Il poserait cependant deux types de problèmes : le premier de cohérence dans le temps de l'action publique (qui jusqu'à aujourd'hui a affiché une valeur du CO₂ de 27 euros la tonne) et le second de transition en concentrant sur une seule année, 2010 en l'occurrence, le changement de référentiel.

Le second scénario consiste à partir d'une valeur proche du rapport de la commission présidée par M. Boiteux pour rejoindre les 100 euros au taux de 5,8 %. Ce scénario s'écarte de la règle de Hotelling en début de période pour lisser le rattrapage nécessaire pour atteindre la valeur de 100 euros en 2030.

C'est ce second scénario qui a été retenu par la commission. Le référentiel proposé s'établit donc au total comme suit :

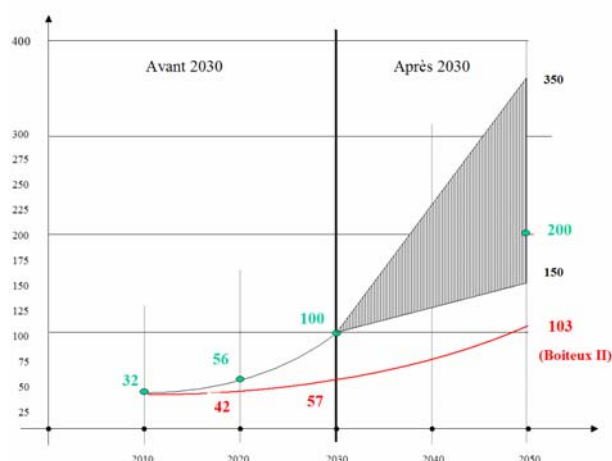
Tableau n° 22 : La valeur de CO₂ recommandée par la commission
(euros 2008)¹

	2010	2020	2030	2050
Valeur CO ₂ recommandée	32	56	100	200 (150-350)
Valeur tutélaire « Boiteux »	32	42	57	103

Source : Centre d'analyse stratégique

(1) Pour la valeur tutélaire actuelle (valeur Boiteux), on utilise la règle proposée dans le rapport correspondant (augmentation de 3 % par an) après avoir actualisé la valeur 2000 pour l'exprimer en valeur 2008.

Graphique n° 16 : La valeur du CO₂ recommandée par la commission



Source : Centre d'analyse stratégique

3. La sensibilité de la valeur du carbone au prix des énergies fossiles

La valeur du CO₂ recommandée est naturellement sensible aux hypothèses politiques et technologiques retenues. Les résultats des modèles présentés au chapitre précédent permettent de cerner la sensibilité de la valeur du CO₂ à ces hypothèses. L'objet de ce paragraphe est d'explicitier la sensibilité de la valeur du CO₂ aux hypothèses économiques, et notamment au prix des énergies fossiles.

3.1. Le référentiel et le contexte des prix énergétiques

Il est souvent postulé un lien direct, quoique fort peu explicité, entre la valeur socio-économique du CO₂ et le prix des énergies fossiles, et plus précisément celui du pétrole. Cette question est d'autant plus importante qu'elle se pose dans un contexte où les cours des énergies fossiles sont en très forte hausse.

Sur ce sujet complexe, on se contentera ici d'avancer quelques principes pour éclairer le débat :

- dans une logique coûts/avantages, la valeur du carbone renvoie au coût actualisé des dommages climatiques induits par l'émission d'une tonne de CO₂. Cette valeur ne dépend pas directement, en première analyse, du prix des énergies fossiles : quel que soit ce prix, une tonne de carbone conduit à un même niveau de dommage marginal que la collectivité doit « monétariser » en tant que tel. Cette proposition est rigoureusement exacte si le dommage marginal est constant. Dans la mesure où le dommage marginal dépend également du sentier d'émissions, la valeur du carbone dépend indirectement de la trajectoire de consommation et du prix des énergies fossiles ;
- dans la logique coûts/efficacité retenue ici, il existe bien une substituabilité entre la valeur du carbone et le prix moyen pondéré des énergies fossiles pour atteindre un objectif donné de réduction des émissions. Plus le prix des énergies fossiles est élevé, plus la valeur du carbone nécessaire pour atteindre un plafond d'émissions donné pourra effectivement être réduite. Cependant, cette substituabilité n'est ni immédiate ni mécanique :

- l'interdépendance ne joue que dans une perspective de moyen terme : une variation transitoire du prix des énergies fossiles ne saurait conduire à modifier une trajectoire de référence du carbone destinée à guider les choix d'investissement publics ;
- une hausse du prix des énergies fossiles ne doit pas conduire à revoir à la baisse la valeur tutélaire si elle résulte d'une croissance mondiale plus vigoureuse qu'anticipé. Dans ce cas de figure, un prix élevé du pétrole peut signaler une augmentation de la croissance mondiale – et donc une augmentation des émissions de gaz à effet de serre – ce qui appellerait une révision à la hausse de la valeur tutélaire du carbone¹ ;
- l'interdépendance joue entre la valeur du carbone et l'ensemble des prix des énergies fossiles, pétrole et gaz, mais aussi charbon. Le débat public tend en effet à se focaliser sur la relation entre le prix du pétrole et la valeur carbone (ou la fiscalité des carburants) en omettant le rôle déterminant des ressources en charbon au niveau mondial.

L'existence de ressources abondantes et peu chères en charbon interdit en effet de dresser une relation mécanique entre prix du pétrole et valeur carbone. Le charbon présente par rapport au pétrole trois spécificités importantes :

- il est plus polluant : les émissions de CO₂ induites par la consommation d'une unité de charbon sont supérieures à celles d'une unité de pétrole ;

Tableau n° 23 : Émissions de CO₂ induites par la consommation d'une tonne équivalent pétrole Tep

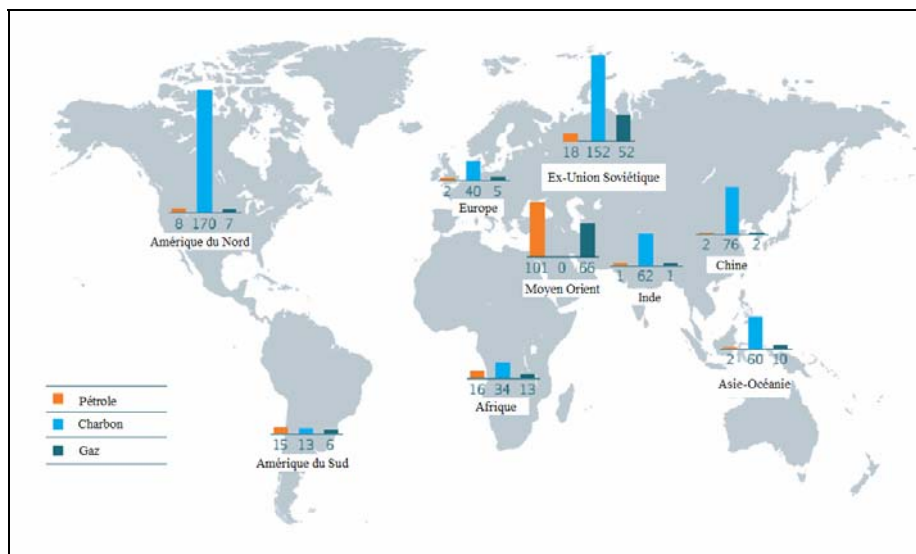
Combustibles	tonne CO ₂ /tep
Pétrole brut et autres produits pétroliers	3,1
Gaz naturel	2,3
Charbon	4,0

Source : Chiffres Clefs Observatoire de l'Energie, Caisse des dépôts, 2007

- il est plus abondant : les réserves de charbon sont plus importantes que celles de pétrole et mieux réparties que les ressources pétrolières ;

(1) Les prix sur le marché pétrolier sont en effet sensibles à la tension entre la demande mondiale de pétrole, qui augmente notamment avec le rattrapage économique rapide des pays émergents, et l'offre mondiale de pétrole, qui est à court terme rigide et sensible au moindre incident interrompant une partie de la production ; à cela s'ajoutent les interrogations sur les ressources mondiales de pétrole encore mobilisables.

**Graphique n° 17 : Localisation des principales réserves d'énergie fossile
(Giga tonnes équivalent pétrole)**



Source : d'après World Coal Institute¹, 2006

- il n'est pas parfaitement substituable, en l'état actuel des technologies, au pétrole. C'est en particulier vrai dans le domaine des transports.

Dans un tel contexte, le charbon a sans doute vocation, en raison de son abondance et de son imparfaite substituabilité au pétrole, à demeurer une énergie de recours pour certains pays, voire l'énergie principale pour d'autres. Cela signifie que dans les secteurs où charbon et pétrole/gaz sont substituables (comme la production d'électricité), une hausse du prix du pétrole peut inciter à se tourner vers le charbon, plus polluant.

3.2. Prix des énergies et valeur du carbone : les signaux des marchés et les simulations des modèles

Une manière de se convaincre de la complexité de la relation entre valeur du carbone et prix du pétrole est d'analyser les signaux envoyés par les marchés du carbone ainsi que les simulations des modèles.

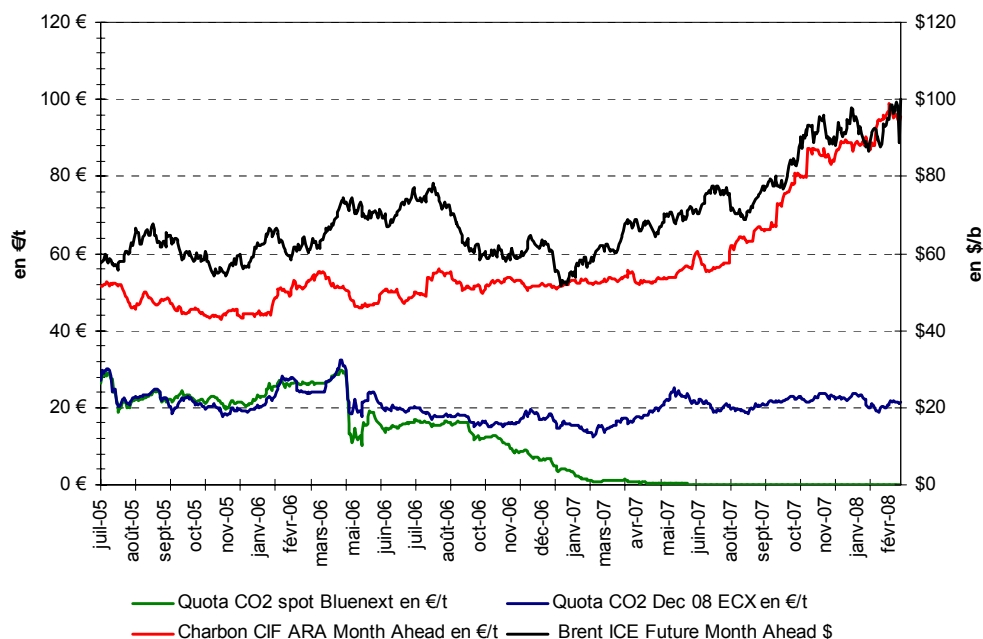
3.2.1. Les prix de marchés

Sur le marché européen des quotas de CO₂ (marché ETS), où le secteur électrique occupe une place importante, l'augmentation du prix du pétrole et celle du gaz qui lui est fortement corrélée ne sont pas accompagnées d'une baisse de la valeur du carbone. Cette situation s'explique en grande partie par l'anticipation d'une tension croissante entre l'augmentation rapide de la demande mondiale d'énergie et la nécessité de réduire les émissions, ainsi que par les substitutions effectives ou probables entre le gaz utilisé dans les centrales au gaz et le charbon². Ce dernier émettant plus de carbone, les acteurs ont dû augmenter leur quota en carbone.

(1) World Coal Institute (2006), *Coal: Liquid Fuels*. Version pdf disponible sur <http://www.worldcoal.org>.

(2) On trouvera une analyse empirique des relations du prix du carbone observées sur l'EU ETS et les prix des énergies (pétrole, gaz naturel et charbon) de 2005 à 2007. Ces deux études économétriques mettent

Graphique n° 18 : Prix du pétrole (dollars/b), du charbon (euros/t) et prix du carbone 2005-2008



Source : Caisse des dépôts, Mission Climat

3.2.2. Les simulations des modèles

Plusieurs tests de sensibilité ont été effectués. Les résultats obtenus par le modèle GEMINI-E3 méritent d'être décrits : ils montrent qu'un prix du pétrole élevé peut dans un premier temps entraîner une diminution de la valeur du carbone, mais qu'il peut conduire en même temps à des investissements sobres en carbone insuffisants, se traduisant dans une seconde phase par des valeurs élevées à la fois du pétrole et du carbone.

Le modèle GEMINI E-3 simule ici la valeur du carbone nécessaire pour respecter le plafonnement des émissions dans deux contextes de prix des énergies différents (voir tableau suivant) toutes choses étant égales par ailleurs et dans le cadre d'un même scénario de réduction ambitieux (450 ppm). Les prix énergétiques pour le charbon et le pétrole font plus que doubler sur la période.

L'évolution de la valeur carbone est alors assez contrastée :

- en 2030, le prix du pétrole et du charbon augmente de 140 % par rapport à la référence ; la valeur carbone diminue de 30 % ;
- en 2050, une augmentation de 60 % sur le prix du pétrole et de 90 % sur le prix du charbon s'accompagne d'une hausse de la valeur du carbone.

Ces résultats s'expliquent :

- si le prix des énergies fossiles est plus élevé en début de période, la consommation d'énergies fossiles est plus faible, ainsi que les émissions qui leur sont liées. Il n'est plus nécessaire d'adjoindre à ces prix une valeur du carbone élevée. On obtient ainsi, jusqu'en

en évidence l'influence des prix du gaz naturel, du charbon et du pétrole sur le prix du CO₂, influence qui varie au cours de ces années. Voir Alberola *et al.* (2008) et Mansannet-Battaler *et al.*(2007).

2030, une valeur du carbone inférieure à celle issue du scénario fondé sur des prix d'énergie plus faibles ;

- en 2040, en revanche, la valeur du carbone devient plus élevée, jusqu'à se situer en 2050 au-dessus de celle calculée avec des prix bas des énergies. Le niveau plus faible de la valeur du CO₂ dans la première période limite en effet la réallocation sectorielle du capital et notamment, au sein du secteur électrique, la pénétration des centrales faiblement émettrices de carbone, dont les centrales au charbon équipées de dispositifs de capture et séquestration de CO₂. Dans ces conditions, l'augmentation très forte à partir de 2040 du plafonnement des émissions conduit à augmenter la valeur du carbone de façon plus importante par rapport au scénario fondé sur des prix d'énergie plus bas.

Tableau n° 24 : Hypothèses sur le prix des énergies fossiles
(dollars 2006)

	Pétrole Brut \$/b		Gaz naturel \$/Mbtu		Charbon \$/t	
	\$ 2006 (référence)	\$ 2006 (scénario haut)	\$ 2006 (référence)	\$ 2006 (scénario haut)	\$ 2006 (référence)	\$ 2006 (scénario haut)
2000	32,49	32.49	4,49	4.49	39	39
2008	62	70	7	7	63	63
2015	57	100	7,5	8	57	100
2030	62	150	8	11	61	150
2050	60	100	10	15	60	120

Source : Modèle GEMINI-E3

Tableau n° 25 : Valeur du CO₂ en euros 2001
Scénario 450 et prix élevés des énergies

	2010	2020	2030	2040	2050
Scénario 450 ppme	5	13	42	122	339
Scénario 450 ppme prix élevés des énergies	0	5	29	123	353

Source : Modélisation GEMINI

Pour l'ensemble de ces raisons, la commission ne propose pas de faire dépendre la valeur tutélaire du carbone de la valeur du pétrole. Elle considère que les valeurs du carbone proposées restent valables pour un prix du pétrole compris entre 50 et 100 euros le baril et pour un prix du charbon compris entre 60 et 120 euros la tonne. Une révision pourrait devenir nécessaire si la tendance de prix du pétrole et du charbon s'écartait durablement de cette fourchette.

Conclusion générale

L'effet de serre est le domaine d'application par excellence de l'économie du risque et de l'incertitude. La valeur tutélaire du carbone recommandée ici est issue d'un compromis fondé sur une analyse aussi exhaustive que possible des informations disponibles. Ce travail est susceptible d'être révisé à intervalles réguliers, par exemple tous les cinq ans en fonction de :

- des travaux de même nature qui pourraient être engagés au niveau européen et qui appelleraient un effort de convergence entre pays ;
- de l'évolution des négociations internationales, en particulier de la conférence des parties prévue fin 2009 à Copenhague ;
- d'informations nouvelles sur le coût potentiel des dommages, sur le coût des efforts d'abattement, sur les prix des énergies fossiles ou sur l'évolution du changement climatique.

Ces incertitudes ne doivent pas être vues comme affaiblissant la démarche et les recommandations de ce rapport :

- l'incertitude est inhérente à toute politique de lutte contre le changement climatique. Elle ne doit pas être un prétexte à l'inaction ou, pour ce qui concerne plus directement l'objet de ce rapport, un obstacle à la « monétarisation » du coût des émissions de CO₂ ;
- l'incertitude sur les chiffrages ne doit pas occulter le fait que ceux-ci ont été réalisés précisément pour réduire l'incertitude et donner de la lisibilité aux acteurs économiques et sociaux sur les engagements pris par l'Europe et la France.

Pour réduire l'incertitude, il faut aussi approfondir l'expertise sur les conséquences du changement climatique et sur l'efficacité des outils à mobiliser pour atteindre les objectifs de réduction de gaz à effet de serre : impact des signaux-prix sur le comportement des agents économiques, conséquences macro-économiques et sociales, enjeux industriels et gestion des transitions professionnelles.

Certaines de ces expertises sont menées au niveau international, et les équipes françaises y sont largement associées. Il n'en demeure pas moins stratégique de disposer d'une expertise nationale pour peser sur les discussions qui s'engageront dans les prochaines années et pouvoir traiter des problèmes qui se poseront plus spécifiquement à la France. Deux domaines méritent ici d'être plus particulièrement soulignés :

- un premier domaine d'approfondissement concerne l'analyse de la demande d'énergie. La connaissance des élasticités-prix de la demande est un point essentiel pour appréhender la capacité d'adaptation de l'ensemble de l'économie à une forte contrainte sur la consommation d'énergie et pour mesurer les coûts de réduction des émissions. Pour répondre à ces interrogations, il est nécessaire de disposer d'enquêtes statistiques régulières et détaillées ;
- un deuxième domaine d'approfondissement porte sur la modélisation des évolutions technologiques en matière d'énergie, tant au niveau de la production que de la diffusion, et sur une meilleure intégration entre politiques de lutte contre le changement climatique et grands équilibres économiques au sein des modèles.

TABLES

Tableaux

Tableau n° 1 : Valeur tutélaire d'une tonne de CO ₂ (<i>en euros 2008</i>).....	11
Tableau n° 2 : Valeur actualisée d'une économie de 10 tonnes de CO ₂ par an <i>sur la période 2010-2050</i>	13
Tableau n° 3 : Table de correspondance entre émissions, concentration et augmentation des températures.....	26
Tableau n° 4 : Les impacts potentiels du réchauffement climatique selon le niveau de températures atteint.....	28
Tableau n° 5 : Les grandes étapes de la négociation internationale.....	30
Tableau n° 6 : Les prix annuels moyens de la tonne de CO ₂ sur le marché européen.....	38
Tableau n° 7 : Prévisions du prix du CO ₂ sur le marché <i>ETS</i>	39
Tableau n° 8 : Synthèse de différentes valeurs.....	43
Tableau n° 9 : Synthèse de différentes valeurs de coûts d'abattement.....	45
Tableau n° 10 : Le référentiel défini en 2001 par le rapport Boiteux.....	46
Tableau n° 11 : Valeur carbone à différents horizons.....	49
Tableau n° 12 : Valeurs recommandées pour les coûts externes.....	49
Tableau n° 13 : Valeurs recommandées pour les coûts externes.....	50
Tableau n° 14 : Synthèse des valeurs du carbone.....	51
Tableau n° 15 : Résultats pour le scénario de base.....	78
Tableau n° 16 : résultats pour le scénario de base.....	79
Tableau n° 17 : Modèles utilisés par la commission.....	80
Tableau n° 18 : Les trois scénarios de la commission.....	81
Tableau n° 19 : Les prix des énergies fossiles en dollars 2006.....	82
Tableau n° 20 : Récapitulation des valeurs carbone (2008) des différents modèles.....	83
Tableau n° 21 : Valeur carbone, réduction des émissions et secteur énergétique.....	85
Tableau n° 22 : La valeur de CO ₂ recommandée par la commission.....	91
Tableau n° 23 : Émissions de CO ₂ induites par la consommation d'une tonne équivalent pétrole Tep.....	93
Tableau n° 24 : Hypothèses sur le prix des énergies fossiles (<i>dollars 2006</i>).....	96
Tableau n° 25 : Valeur du CO ₂ en euros 2001 Scénario 450 et prix élevés des énergies.....	96

Graphiques

Graphique n° 1 : Représentation schématique des échanges de flux constitutifs de l'effet de serre.....	24
Graphique n° 2 : Les émissions de gaz à effet de serre selon les différents scénarios du GIEC <i>Giga tonne de CO₂ eq/an</i>	27
Graphique n° 3 : La consommation mondiale d'énergie primaire.....	33
Graphique n° 4 : Prix du pétrole (brent) et du gaz.....	34

Graphique n° 5 : L'évolution du prix des différentes énergies fossiles (<i>dollars courants/tep</i>).....	36
Graphique n° 6 : Répartition des différentes valeurs des coûts des dommages dans la littérature économique (<i>dollar par tonne de carbone</i>).....	42
Graphique n° 7 : Courbes de coût d'abattement (Royaume-Uni)	44
Graphique n° 8 : Relation entre objectif de réduction et prix du carbone.....	47
Graphique n° 9 : Approche coûts/avantages	54
Graphique n° 10 : L'approche coûts/efficacité	55
Graphique n° 11 : Variations de la valeur d'équilibre	56
Graphique n° 12 : Effet de serre et limites quantitatives sur le CO ₂	64
Graphique n° 13 : Valeur carbone et périodes de transition	66
Graphique n° 14 : Stratégie optimale en univers incertain	72
Graphique n° 15 : Profils d'émissions retenus dans les trois scénarios de contrainte <i>Indicés sur 1990</i>	82
Graphique n° 16 : La valeur du CO ₂ recommandée par la commission.....	92
Graphique n° 17 : Localisation des principales réserves d'énergie fossile (<i>Giga tonnes équivalent pétrole</i>).....	94
Graphique n° 18 : Prix du pétrole (dollars/b), du charbon (euros/t) et prix du carbone 2005-2008.....	95

Bibliographie

Alberola E., Chevallier J. et Cheze B (2008), "Price Drivers and Structural Breaks in European Carbon Prices 2005-07", *Energy Policy*, 36 (2), 787-797.

Ambrosi P., Hourcade J.-C., Hallegatte S., Lecocq F., Dumas P. et Ha-Duong M. (2003), "Optimal Control Models and Elicitation of Attitudes Towards Climate Damages", *Environmental Modeling and Assessment*, 8, p. 133-47.

Arrow K. J. (1995), "Inter-generational Equity and the Rate of Discount in Long-term Social Investment", *Paper at IEA World Congress*, décembre, disponible sur : <http://www.econ.stanford.edu/faculty/workp/swp97005.htm>.

Arrow K. J. et Fischer A. C. (1974), Environmental Preservation, Uncertainty and Irreversibility, *Quarterly Journal of Economics*, 88, 312-319.

Arrow K. J. et Lind R. C. (1970), Uncertainty and the Evaluation of Public Investment Decision, *American Economic Review*, 60, 364-378.

Barsky R. B., Juster F. T., Kimball M. S. et Shapiro M. (1997), "Preference Parameters and Behavioral Heterogeneity: An Experimental Approach in the Health and Retirement Study", *Quarterly Journal of Economics*, 537-79.

Baumstark L. (2007), « La mesure de l'utilité sociale des investissements : l'enjeu du processus de production des valeurs tutélaires », in J. Maurice et Y. Crozet (dir.), *Les dimensions critiques de calcul économique*, Paris, Economica.

Baumstark L. et Guesnerie R. (2007), *La collectivité face à la valeur sociale du carbone, Vers la nécessaire construction d'un référentiel partagé*, document de travail pour la Commission nationale de l'énergie présidée par Jean Syrota, Centre d'analyse stratégique.

Bernard A., Vielle M. et Viguier I. (2005) « Premières simulations de la directive européenne sur les quotas d'émission avec le modèle GEMINI-E3 », *Économie et Prévision*, n° 169-170, 2005-3/4/5, p. 171-196.

Blanchard O., Criqui P., Kitous A. et Mima S. (2006), « Impact des politiques climatiques sur le prix du carbone et les marchés de l'énergie », *Revue d'économie financière*, n° 83.

Boissieu (de) C. (2006), *Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050*, Rapport pour le ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie et le ministère de l'Écologie et du Développement durable, août.

Bruce J. P., Lee H., Haites E. F. (eds.) (1996), *Climate Change 1995 - Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.

Capros P. et Mantozos L. (2000), *The Economic Effects of EU-Wide Industry-Level Emission Trading to Reduce Green-house Gases. Results from PRIMES Energy Systems Model*, OCCSN, Universidad Técnica Nacional de Atenas.

Célestin-Urbain J. (2008), *Conséquences économiques à long terme du changement climatique*, Trésor Eco, Direction générale du Trésor et de la Politique économique (DGTPE), ministère des Finances, *Lettre*, n° 30, février.

Centre d'analyse stratégique (2007a), *Les perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, Rapport du groupe de travail présidé par Jean Syrota, septembre.

Chakravorty U., Moreaux M. et Tidball M. (à paraître), "Ordering the Extraction of Polluting non Renewable Resources", *American Economic Review*.

- Cochrane J. (2001), *Asset Pricing*, Princeton University Press.
- Commissariat général du Plan (2005), *Le prix du temps et la décision publique*, Rapport du groupe présidé par Daniel Lebègue, rapporteur général Luc Baumstark, coordinateur Philippe Hirtzmann, Paris, La Documentation française.
- Commissariat général du Plan (2001a), *Transport : choix des investissements et coût des nuisances*, Rapport du groupe de travail présidé par Marcel Boiteux, rapporteur général Luc Baumstark, Paris, La Documentation française.
- Commissariat général du Plan (2001b), *Effet de serre : Modélisation économique et décision publique*, Rapport du groupe présidé par Jean-Noël Giraud, Paris, La Documentation française.
- Commissariat général du Plan (1998), *Énergie 2010-2020. Les chemins d'une croissance sobre*, Rapport du groupe présidé par Pierre Boisson, Paris, La Documentation française.
- Commissariat général du Plan (1994), *Transports : pour un meilleur choix des investissements*, Rapport du groupe de travail présidé par Marcel Boiteux, Paris, La Documentation française.
- Criqui P., Mima S. et Kitous A. (2007), *The European Energy System in the Context of Long Term Climate Policies*, IAEE Conference, (à paraître).
- Dasgupta P. et Heal G. (1974), "The Optimal Depletion of Exhaustible Resources", *The Review of Economic Studies*, vol. 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, p. 3-28.
- DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) (2007), *The Social Cost of Carbon and the Shadow Price of Carbon : What they are and How to Use them in Economic Appraisal in the UK*, Economics Group of DEFRA, décembre : <http://www.defra.gov.uk>.
- De Perthuis C. et Boccon Gibbod J. C. (2006), « Le marché européen des quotas de CO₂ : les leçons d'un an de fonctionnement », *Revue d'économie financière*, n° 83.
- De Perthuis C., Convery F. et Ellerman D. (2008), *Le marché européen du carbone en action : enseignements de la première phase*, Rapport Intermédiaire - Caisse des dépôts, MIT CEEPR et UCD.
- Downing *et al.* (2005), *The Social Cost of Carbon: A Closer Look at Uncertainty*.
- Ellerman A. D. et Buchner B. (2008), « Over-allocation or Abatement: A Preliminary Analysis of the EU ETS Based on the 2005-06 Emissions Data », *Environmental and Resource Economics*, vol. 39. (à paraître).
- IPCC (2007), *Climate Change 2007*, Mitigation Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report to the IPCC [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosh, R. Dave, L. A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Godard O. (2007), « Le rapport Stern sur l'économie du changement climatique était-il une manipulation grossière de la méthodologie économique ? », *Revue d'économie politique*, 117 (4), août.
- Godard O. (2004), « Autour des conflits à dimension environnementale - Évaluation économique et coordination dans un monde complexe », *Cahiers d'Économie politique*, n° 47, septembre, p. 27-153.
- Gollier C., Jullien B. et Treich N. (1999), "Scientific Progress and Irreversibility: An Economic Interpretation of the Precautionary Principle", *Journal of Public Economics* (à paraître).
- Gollier C. (2007a), *La Finance durable du Rapport Stern*, Toulouse School of Economics.
- Gollier C. (2007b), "The Consumption-based Determinants of the Term Structure of Discount Rates", *Mathematics and Financial Economics*, 1 (à paraître).
- Gollier C. (2002a), "Discounting an Uncertain Future", *Journal of Public Economics*, 85, 149-166.

- Gollier C. (2002b), "Time Horizon and the Discount Rate", *Journal of Economic Theory*, 107, 463-473.
- Gollier C. (2001a), "Wealth Inequality and Asset Pricing", *The Review of Economic Studies*, 68, 181-203.
- Gollier C. (2001b), *The Economics of Risk and Time*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Guesnerie R. (2004), « Calcul économique et développement durable », *Revue économique*, 55, p. 363-382.
- Guesnerie R. (2003), *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, Rapport du CAE, n° 39, Paris, La Documentation Française, 265 p.
- Ha-Duong M, Grubb M. et Hourcade J.-C. (1997), "Influence of Socioeconomic Inertia and Uncertainty on Optimal CO₂ Emission Abatement", *Nature*, 390, p. 270-274.
- Ha-Duong M. et Treich N. (2004), "Risk Aversion, Intergenerational Equity and Climate Change", *Environmental and Resource Economics*, 28, p. 195-207.
- Hallegatte S., Hourcade J.-C. et Ambrosi P. (2006), "Using Climate Analogues for Assessing Climate Change Economic Impacts in Urban Areas", *Climatic Change*, 82, p. 47-60.
- Hammit J. K., Lempert R. J. et Schlesinger M. E. (1992), "A Sequential-Decision Strategy for Abating Climate Change", *Nature*, 357, p. 315-318.
- Heal G. (2005), "Intertemporal Welfare Economics and the Environment", in K.-G. Maler et J. R. Vincent (eds), *Handbook of Environmental Economics*, vol. 3, Elsevier.
- Hotelling H. (1931), "The Economics of Exhaustible Resources", *Journal of Political Economy*, 39, 137-175.
- Hourcade J.-C. (1997), « Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l'effet de serre », in Godard O. (dir.), *Le Principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, éditions de la MSH et INRA-éditions, Paris, p. 259-294.
- Hourcade J.-C. (1997), "Influence of socio-economic inertia and uncertainty on optimal CO₂ Emissions Abatement", *Nature*, 390, p. 270-273.
- Hourcade J.-C. et Hallegatte S. (2007), *Le rapport Stern sur l'économie du changement climatique : de la controverse scientifique aux enjeux pour la décision publique et privée*, CIRED.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007*, Mitigation Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report to the IPCC [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosh, R. Dave, L. A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Jonas H. (1998), *Le Principe de responsabilité*, Paris, Flammarion.
- Lecocq F. (2006), « Les marchés carbone dans le monde », *Revue d'économie financière*, n° 83.
- Lecocq F. et Cappoor K. (2005), « States and Trends of the Carbon Market 2005 », *Carbon Finance Business*, World Bank, Washington DC.
- Lecocq F. et Hourcade J.-C. (2004), « Le taux d'actualisation contre le principe de précaution ? Leçons à partir du cas des politiques climatiques », *L'Actualité économique*, 80.
- Manne A. S. et Richels R. G. (1992), *Buying Greenhouse Insurance*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Mansannet-Battaler M., Pardo A. et Valor E. (2007), "CO₂ Prices, Energy and Weather", *The Energy Journal*, 28, 73-92.
- Mendelsohn R. O. (2007), A Critique of the Stern Report, *Regulation*, hiver 2006-2007, 42.
- Mendelsohn R., Morrison W., Schlesinger M. et Andronova N. (2000), "Country-Specific Market Impacts of Climate Change", *Climatic Change*, 45, p. 553-569.

- Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, ministère de l'Écologie et du Développement durable (2006), *Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050*, Rapport du groupe de travail présidé par Christian de Boissieu, août.
- Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer (2006), *La demande de transport en 2025, Projections des tendances et des inflexions*, DAEI, Paris.
- Newell R. G. et Pizer A. W. (2001), *Discounting the Benefits of Climate Change Mitigation*, Pew Center on Global Climate Change, Washington DC, 37 p.
- Nordhaus W. (2007), *The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy*, Yale University, avril.
- Nordhaus W. (2007), "The Stern Review of the Economics of Climate Change", *mimeo*, Yale University.
- Nordhaus W. et Boyer R. (2000), "Warming the World: Economic Models of Climate Change", MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- O'Neill B. C., Crutzen P., Grübler A., Ha Duong M. *et al.* (2006), "Learning and Climate Change", *Climate Policy*, 6, p. 585-589.
- Pearce D. W. (2003), "The Social Cost of Carbon and its Policy Implications", *Oxford Review of Economic Policy*, 19: 362-384.
- Pouliquen H. et Bodiguel A. (2007), « Les objectifs énergétiques de la France à l'horizon 2020 », *note interne*, Centre d'analyse stratégique, 21 novembre.
- Prevot H. (2007), *Trop de pétrole, Énergie fossile et réchauffement climatique*, Paris, Seuil.
- Ramana V. P., Sinha C. S. et Shukla P. R. (2001), "Renewable Energy Technologies and Climate Change Policies in India", *International Journal of Environmental Technology and Management*, 1, p. 424-443.
- Solow M. R. (1987), "Prize Lecture, Growth Theory and After", *The Sveriges Risksbank Prize in Economic Sciences in Memory of Alfred Nobel*.
- Stern N. (2006) *The Economics of Climate Change : the Stern Review*, UK House of Commons. Treasury : <http://www.hm-treasury.gov.uk/>.
- Stern N. (1977), "The Marginal Valuation of Income", in M. Artis et A. Nobay (eds), *Studies in Modern Economic Analysis*, Blackwell: Oxford.
- Tol R. S. J. (2006), "The Stern Review of Economics of Climate Change : A Comment", *Energy & Environment*, vol. 17, n° 6.
- Tol R. S. J. (2005), « The Marginal Damage Costs of Carbon Dioxide Emissions: An assessment of the Uncertainties », *Energy Policy*, 33 (16), 2064-2074.
- Tol R. S. J. (2002a), "New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part I: Benchmark Estimates", *Environmental and Resource Economics*, 21, p. 47-73.
- Tol R. S. J. (2002b), "New Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part II: Dynamic Estimates", *Environmental and Resource Economics*, 21, p. 135-160.
- Ulph A. et Ulph D. (1994), "The Optimal Time Path of a Carbon Tax", *Oxford Economic Papers*, 46.
- Watkiss P. (2005), *The Social Cost of Carbon Review, Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment*, AEA Technology Environment, Research of behalf of DEFRA, décembre.
- Watkiss P., Downing T., Handley C. et Butterfield R. (2005), *The Impacts and Cost of Climate Change*, rapport pour la Commission européenne.
- Weitzman M. (2007), "The Stern Review of the Economics of Climate Change", Preliminary Draft of a Review for the *Journal of Economic Literature*.

Weitzman M. (1998), "Why the Far-Distant Future Should be Discounted at its Lowest Possible Rate", *Journal of Environmental Economics and Management*, 36, p. 201-208.

Wigley T. M. L., Richels R. et Edmonds J. A. (1996), "Economic and Environmental Choices in the Stabilization of Atmospheric CO₂ Concentrations", *Nature*, 379, p. 240-243.

Yahvonen O. (1997), "Fossil Fuels, Stock Externalities and Backstop Technology", *Canadian Journal of Economics*, 30.

MEMBRES DE LA COMMISSION

Président :

QUINET Alain, Inspecteur général des finances

Rapporteur général :

BAUMSTARK Luc, Université Lyon 2 (LET), Centre d'analyse stratégique

Rapporteurs :

CELESTIN-URBAIN Joffrey, Direction générale du trésor et de la politique économique, ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi

POULIQUEN Hervé, Centre d'analyse stratégique

Coordinateurs :

AUVERLOT Dominique, Centre d'analyse stratégique

RAYNARD Christine, Centre d'analyse stratégique

Membres :

ADOLEHOUME Béatrice, Direction des études économiques et de l'évaluation environnementale, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

ALLARD Gérard, France Nature Environnement

BADRE Michel, Inspection générale de l'environnement, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

BECKER Jean-Jacques, Direction des affaires économiques et internationales, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

BERGOUNHOU Régis, France Nature Environnement

BERNARD Alain, Conseil général des Ponts et Chaussées, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

BOMPARD Jean-Pierre, Confédération française démocratique du travail (CFDT)

BOQUET Nicolas, Directeur Environnement de l'Association française des entreprises privées (AFEP)

BOUTTES Jean-Paul, EDF

BROGGIO Dominique, Confédération générale des petites et moyennes entreprises (CGPME)

BUREAU Dominique, Direction des affaires économiques et internationales, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

CAMBILLARD Jean-Pierre, Direction générale des routes, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

CAPMAS Alain, Mouvement des entreprises de France (MEDEF)

COZZI Laura, Agence internationale de l'énergie (AIE)

CRASSOUS Renaud, Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)

CRIQUI Patrick, Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale (LEPII), CNRS-Université de Grenoble

DE PERTHUIS Christian, Caisse des dépôts et consignations (CDC)

DUPUCH Sébastien, Force ouvrière (FO)

GODARD Olivier, Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

GOLLIER Christian, Toulouse School of Economics (LERNA et IDEI)

GRANDJEAN Alain, Fondation Nicolas Hulot

GRESSIER Claude, Conseil général des Ponts et Chaussées, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

HEUX Roger, Direction générale des routes, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

HOURCADE Jean-Charles, Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)

KITOUS Alban, Enerdata

KOUSNETZOFF Nina, Centre d'études prospectives et d'informations internationales (CEPII)

LAMOTTE Henri, Direction générale du trésor et de la politique économique, ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi

LAVERGNE Richard, Direction générale de l'énergie et des matières premières, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

LEUXE André, Direction générale de la mer et des transports, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

MAGGIAR Nicolas, Banque de France

MAURICE Joël, École nationale des Ponts et Chaussées, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

MOULINIER Jean-Marc, Secrétariat général, mission stratégie, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

NGUYEN Anna, Direction du budget, ministère du Budget, des Comptes publics et de la Fonction publique

ORPHELIN Matthieu, ADEME

PERBET Martine, Centre d'analyse stratégique

QUIRION Philippe, Réseau Action Climat

RAUX Charles, Laboratoire d'économie des transports (LET)

ROVIRA Isabelle, Groupement des autorités responsables de transports (GART)

SCHNEIDER Jean-Luc, Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE)

SCHUBERT Katheline, Université Paris 1-Panthéon Sorbonne, Paris School of Economics

TROCHET Jean-Michel, EDF

VIELLE Marc, École polytechnique fédérale de Lausanne (REME) et Toulouse Sciences économiques (LERNA)

Le Premier Ministre

Paris, le 16 JAN. 2008

N° 2004

Monsieur le Ministre,

Les différents travaux que vous avez menés sur les perspectives énergétiques à l'horizon 2020-2050 soulignent la nécessité pour l'Etat de disposer d'une chronologie de valeurs de la tonne de CO₂ établie en fonction des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre retenus par le Gouvernement.

Compte tenu des incertitudes actuelles sur l'amplitude exacte des dérèglements climatiques et des différentes approches théoriques possibles, les estimations de la valeur de la tonne de CO₂ doivent être déterminées en associant le plus largement possible les experts, y compris les principaux acteurs du Grenelle, et les utilisateurs potentiels de cette valeur.

Ce nouveau référentiel devra être établi en tenant compte des travaux de la Commission européenne et même s'il peut être fondé sur des choix plus volontaristes en matière de lutte contre les dérèglements climatiques.

Dans cette perspective, je vous serais reconnaissant de mettre en place une commission d'experts, français et étrangers, qui sera chargée d'arrêter une chronologie de valeurs de la tonne de CO₂ destinée à constituer la référence de la puissance publique. Ces valeurs devront être discutées au regard des autres paramètres retenus dans les calculs socio-économiques menés dans le secteur des transports : en particulier la valeur du temps retenue pour l'usager, le taux d'actualisation et les estimations du coût futur des hydrocarbures et les valeurs attachées aux polluants atmosphériques. Une analyse des déterminants de la valeur de la tonne de carbone sur le marché européen de quotas devra également éclairer l'analyse.

Afin que ces travaux puissent être utilisées dans le cadre des actions prévues par le Grenelle de l'environnement, notamment en matière de révision de nos schémas d'infrastructures de transport à l'horizon 2025, la mission devra remettre ses conclusions pour la fin du premier trimestre 2008.

Je vous prie de croire, Monsieur le Ministre, à l'assurance de mes sentiments les meilleurs.

Dei tui

François Fillon

Monsieur Eric BESSON
Secrétaire d'Etat auprès du Premier ministre
Chargé de la Prospective et de l'Evaluation des politiques publiques
35, rue Saint Dominique
75007 PARIS

François FILLON

Copie à Monsieur le Directeur général du Centre d'analyse stratégique.