

Kyoto et l'économie de l'effet de serre

Rapport

Roger Guesnerie

Commentaires

Paul Champsaur

Alain Lipietz

Compléments

*Philippe Ambrosi, Jean-Louis Bal, Philippe Ciais,
Patrick Criqui, Christine Cros, Jean-Claude Duplessy,
Sylviane Gastaldo, Jean-Charles Hourcade,
Philippe Jean-Baptiste, Jean Jouzel, Franck Lecocq,
François Moisan, Alain Morcheoine,
Cédric Philibert, Marc Vielle et Laurent Viguié*

*Réalisé en PAO au Conseil d'Analyse Économique
par Christine Carl*

© La Documentation française. Paris, 2003 - ISBN : 2-11-005255-4

« En application de la loi du 11 mars 1957 (article 41) et du Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992, toute reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans l'autorisation expresse de l'éditeur.

Il est rappelé à cet égard que l'usage abusif de la photocopie met en danger l'équilibre économique des circuits du livre. »

Sommaire

Introduction	5
<i>Mario Dehove</i>	

RAPPORT	
Les enjeux économiques de l'effet de serre	9
<i>Roger Guesnerie</i>	

<i>Introduction</i>	<i>9</i>
<i>1. Les diagnostics</i>	<i>10</i>
1.1. L'homme et les gaz à effet de serre	10
1.2. Gaz à effet de serre et changement climatique	15
1.3. L'action internationale	18
<i>2. L'économie de l'effet de serre : un bilan coûts-avantages</i>	<i>21</i>
2.1. Le climat, bien collectif global	21
2.2. La maîtrise de l'effet de serre : la nature des coûts	23
2.3. La maîtrise de l'effet de serre : évaluation des coûts agrégés	27
2.4. L'évaluation des dommages dus au changement climatique	31
2.5. L'actualisation	33
2.6. La valeur d'option	35
2.7. Les limites respectives de la climatologie et de l'économie : une parenthèse	37
<i>3. L'évaluation économique du Protocole de Kyoto</i>	<i>40</i>
3.1. La chronologie de l'action	40
3.2. L'ampleur de l'action	41
3.3. Évaluation critique des mécanismes de flexibilité	45
3.4. L'architecture de Kyoto, en courte période : un « <i>second best</i> » perfectible	49
<i>4. Concrétiser Kyoto</i>	<i>52</i>
4.1. Kyoto sans les États-Unis ?	52
4.2. Les options de la politique climatique : un tour d'horizon	55
4.3. Les défis de la politique climatique en France et en Europe	61
4.4. La compétitivité de l'espace Kyoto	63

5. <i>Kyoto : relance, améliorations et prolongements</i>	66
5.1. Relancer Kyoto	66
5.2. Améliorer Kyoto	69
5.3. Prolonger Kyoto... ..	72
6. <i>Conclusion</i>	77
6.1. Kyoto justifié	77
6.2. Kyoto magnifié	78
6.3. Kyoto effiloché	79
6.4. Kyoto ranimé et concrétisé	79
6.5. Kyoto relancé et prolongé	81
<i>Glossaire</i>	87

COMMENTAIRES

<i>Paul Champsaur</i>	91
<i>Alain Lipietz</i>	93

COMPLÉMENTS

A. Certitudes et incertitudes du changement climatique	97
<i>Philippe Jean-Baptiste, Philippe Ciais, Jean-Claude Duplessy et Jean Jouzel</i>	
B. Évaluer les dommages : une tâche impossible ?	117
<i>Philippe Ambrosi et Jean-Charles Hourcade</i>	
C. Les coûts des politiques climatiques	145
<i>Patrick Criqui, Marc Vielle et Laurent Viguier</i>	
D. Incertitude, irréversibilités et actualisation dans les calculs économiques sur l'effet de serre	177
<i>Franck Lecocq et Jean-Charles Hourcade</i>	
E. Prix versus quantités : plafonner les coûts pour aller plus loin	201
<i>Cédric Philibert</i>	
F. Marchés de droits, expériences et perspectives pour l'effet de serre	217
<i>Christine Cros et Sylviane Gastaldo</i>	
G. Les technologies de réduction des émissions de gaz à effet de serre	233
<i>Jean-Louis Bal, François Moisan et Alain Morcheoine</i>	
RÉSUMÉ	249
SUMMARY	257

Introduction

Avec ce rapport sur l'effet de serre de Roger Guesnerie, le Conseil d'analyse économique se saisit d'une des questions qui pourraient compter parmi les plus essentielles des prochaines décennies.

Une des plus complexes aussi, qui oblige la réflexion à se projeter vers des horizons de temps, des degrés d'incertitude et des échelles de risque qu'elle n'a pas l'habitude d'explorer.

Question préalable au débat économique : la communauté internationale a-t-elle eu raison de se mobiliser dès 1992 et de lancer une négociation sur la réduction des gaz à effet de serre qui a abouti au Protocole de Kyoto ? Est-on sûr de la réalité physique de leur responsabilité dans l'augmentation observée de la température de l'atmosphère ? L'audience des analyses récentes de Bjorn Lomborg montre que la discussion scientifique n'est pas close alors que le refus récent des États-Unis de ratifier le Protocole de Kyoto lui donne un relief politique renouvelé. Roger Guesnerie, sans écarter les objections des dissidents, retire finalement des conclusions de plus en plus convergentes des travaux scientifiques la conviction que l'accumulation rapide des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est bien un des facteurs importants des changements climatiques que l'on observe. Et il souligne que l'incertitude inévitable de ces résultats ne doit pas, de toutes façons, conduire à l'attentisme.

Dès lors, quels sont les moyens économiques les plus efficaces et les plus équitables pour réduire les émissions de ces gaz ?

Répondre à cette question suppose d'évaluer les coûts et les avantages des politiques de l'énergie. Des nombreux travaux de modélisation qui ont déjà été réalisés des scénarios très contrastés peuvent être retenus. Ils peuvent inspirer des politiques très diverses, voire opposées.

Roger Guesnerie met en garde contre des interprétations trop hâtives de ces travaux prospectifs, et il invite à la plus grande prudence. Les techniques de l'actualisation sont à cet horizon temporel difficiles à mettre en œuvre. Les vitesses de maturation des innovations étant incertaines, l'arrivée d'informations nouvelles et l'irréversibilité des solutions technologiques imposent la nécessité d'intégrer dans l'analyse des valeurs d'option.

Mais, loin d'inspirer scepticisme et passivité, ces arguments méthodologiques et les contraintes institutionnelles imposées par le cadre néces-

sairement international d'un tel arrangement entre gouvernements conduisent à rejeter les critiques des adversaires du Protocole de Kyoto. Cet accord n'est pas prématuré, l'ampleur de l'effort qu'il impose est justifiée, il ne faut pas attendre passivement les progrès techniques salvateurs, car l'action actuelle renforce les incitations à la recherche et aux innovations. Les mécanismes de flexibilité – le marché des permis d'émission – réduisent utilement les coûts de mise en œuvre. Sur ce dernier point le rapport de Roger Guesnerie est en accord avec un précédent rapport du Conseil d'analyse économique sur la fiscalité de l'environnement rédigé par Olivier Godard et Claude Henry.

Mais le Protocole de Kyoto n'est pas exempt de défauts et il doit être amélioré. Roger Guesnerie ouvre de nombreuses pistes dont certaines sont très ambitieuses. Il fixe une priorité absolue, celle d'intégrer les pays en développement de façon équitable en rendant attrayant l'accord pour ces pays encore peu pollueurs mais qui entendent ne pas être bridés dans leur développement économique et social.

Il faut aussi stabiliser, par l'instauration de prix plancher et de prix plafond, le fonctionnement du marché des permis, sur lequel on sait encore peu de choses car il n'y a pas de précédent comparable. La mise en place d'un système de sanctions crédibles et un accord sur les principes à long terme devraient lever les incertitudes sur l'avenir des avantages historiques dont bénéficient aujourd'hui les pays développés et faciliter le renouvellement périodique des engagements de réduction des États signataires.

Reste la difficile question de la participation des États-Unis, à qui il a peut-être été demandé des efforts trop importants, qu'ils ne pouvaient consentir, et dont le récent retrait fragilise l'accord. Roger Guesnerie plaide pour que l'Europe persévère dans son action malgré leur défection et continue à montrer la bonne voie à la communauté internationale. Mais il souligne aussi avec beaucoup d'insistance la nécessité de protéger l'espace Kyoto contre des distorsions de concurrence que le Protocole crée nécessairement et contre les risques de délocalisation qu'il engendre.

Ce rapport conforte ainsi les conclusions du rapport du Conseil d'analyse économique sur la Gouvernance mondiale rédigé par Pierre Jacquet, Jean Pisani-Ferry et Laurence Tubiana qui proposait aussi de resserrer les liens entre l'Organisation mondiale du commerce et une future organisation mondiale de l'environnement à créer et de revoir les schémas intellectuels qui inspirent les organisations internationales actuelles.

Ce rapport a été discuté à la séance du 27 juin 2002 du Conseil d'analyse économique, puis le 11 juillet 2002 en présence du Premier ministre. Il est commenté par Paul Champsaur et Alain Lipietz.

Mario Dehove

Président délégué par intérim du Conseil d'analyse économique

Remerciements

Ce rapport doit évidemment beaucoup à tous ceux, et en premier lieu Jean-Christophe Bureau, qui ont fait vivre un groupe de travail qui a rassemblé et entendu quelques un(e)s des meilleurs experts français (et quelques étrangers) du sujet.

Ce rapport fait donc état des convictions acquises à leur contact. Même si ce texte n'a pas nécessairement l'aval majoritaire du groupe sur tous les points, il se veut le porte-parole de ses analyses les plus consensuelles. Sans vouloir citer tous les participants, il faut nommer, pour leur présence et leurs contributions, les « piliers » du groupe qu'ont été Jean-Charles Hourcade, qui a de plus mobilisé ses jeunes collègues du CIRED, Sylviane Gastaldo, Alain Bernard, Marc Vielle, Cédric Philibert, François Moisan, Alain Ayong Le Kama ou encore Claude Henry et Michel Moreaux. Patrick Criqui, Katheline Schubert, Joël Maurice, Pierre-Alain Jayet, Olivier Godard, Richard Baron, Dominique Bureau, Nina Kousnetzoff, Alexia Leseur, Frédéric Gherzi, Jean-Jacques Becker, Emmanuel Martinez, ont souvent apporté leur contribution aux discussions, tout comme les experts qui ont présenté leurs travaux au groupe, comme Jean Jouzel, Philippe Jean-Baptiste, Jean-Claude Duplessy, Philippe Ciais, Christine Cros, Christian Gollier, Chris Boyd, Geoffrey Heal et François Falloux.

Ont été également auditionnés Carolyn Fisher, Margo Thorning, Laurence Tubiana, Francis Meunier, ainsi que d'autres contributeurs plus occasionnels. Des versions préliminaires de ce texte ont bénéficié des remarques de Philippe Ambrosi, Alain Bernard, Dominique Bureau, Christine Cros, André Fourçans, Frédéric Gherzi, Pierre-Alain Jayet, Blaise Leenhardt, André Masson, Francis Meunier, Katheline Schubert et Jean-François Vergès et de discussions approfondies à Paris avec Sylviane Gastaldo, Olivier Godard, Jean-Charles Hourcade, Cédric Philibert, à Princeton avec David Bradford.

Le texte tient aussi compte des commentaires de ses discutants, Paul Champsaur et Alain Lipietz, et également des observations de Dominique Dron, Lionel Fontagné et Pierre Jacquet.

Roger Guesnerie

Les enjeux économiques de l'effet de serre

Roger Guesnerie

Professeur au Collège de France

Introduction

En juin 2002, plus de 55 pays ont d'ores et déjà ratifié le Protocole de Kyoto (1997). Mais comme la somme cumulée de leurs émissions ne représente pas encore 55 % des émissions totales des pays industrialisés en 1990, l'entrée en vigueur du protocole est, à ce jour, toujours suspendue à la signature annoncée de la Fédération de Russie.

Parmi tous les accords multilatéraux environnementaux préparés à ce jour, Kyoto se signale par l'ambition de son projet. Il organise une architecture multilatérale de lutte contre le changement et affiche des objectifs de réduction quantifiés et contraignants. L'ampleur de l'effort envisagé est rendue crédible par la mise en place de mécanismes d'observance novateurs. Les conférences de Bonn et Marrakech ont, semble-t-il, préservé l'essentiel. Mais fragilisé par le retrait américain, l'accord est-il aujourd'hui toujours viable ? Si oui, que dire de sa mise en œuvre à l'échelon français et européen ? Comment préparer l'après Kyoto ? Telles sont les questions, que conformément au mandat initial, ce rapport passe en revue.

Une position, celle de l'auteur de ce rapport, plus extérieure au débat qu'il n'est d'usage pour les rapports du Conseil d'analyse économique, appelle quelques commentaires préliminaires. Elle donne l'avantage de l'observation à distance de controverses parfois tumultueuses dont les fronts sont multiples et enchevêtrés. Elle a l'inconvénient de fonder le diagnostic à partir d'un regard particulier, celui de l'économie publique au sens large sur un sujet multiforme qui a suscité des milliers de contributions scienti-

fiques de climatologues, d'économistes, de sociologues, de politologues, de commentaires de philosophes et de multiples prises de position dans la société civile. Ce rapport s'efforce de conjuguer au mieux distance maintenue et familiarité accrue⁽¹⁾.

Le plan adopté pour le rapport est le suivant :

- la première partie présente un *diagnostic* synthétique de l'évolution des déterminants de l'effet de serre et des menaces climatiques qui en résultent ;
- la deuxième partie, intitulée « *l'économie de l'effet de serre* », passe en revue les schémas intellectuels dont dispose l'économiste pour analyser les politiques de lutte contre l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre ;
- la troisième partie est consacrée à *l'évaluation économique du Protocole de Kyoto*. Elle évalue l'opportunité d'une action précoce, discute l'ampleur de l'effort décidé à Kyoto, revient sur les mécanismes mis en place et plus généralement sur l'architecture du protocole ;
- la quatrième partie examine les moyens de *concrétiser Kyoto*. Compte tenu de l'absence des États-Unis, elle commente les conditions d'une mise en œuvre efficace et conforme aux exigences de compétitivité au sein de chacune des parties adhérentes, en particulier de l'Union européenne ;
- la cinquième partie, en examinant comment *relancer, améliorer et prolonger Kyoto*, revient sur les conditions d'une consolidation et d'un dépassement des arrangements actuels.

1. Les diagnostics

Les gaz dits à effets de serre retenus dans les accords de Kyoto sont le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆)⁽²⁾. Ils jouent un rôle décisif dans les échanges énergétiques entre notre planète et son environnement. Grâce à leur présence, l'atmosphère terrestre, à la manière d'une serre, piège une partie du rayonnement solaire réfléchi par la terre. Heureux effet : en leur absence, la température estimée de la planète serait aux alentours de moins 20° C.

1.1. L'homme et les gaz à effet de serre

La concentration d'un gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère résulte de son accumulation. Elle reflète la somme de ses émissions antérieures, pondérée par des coefficients qui traduisent les modalités et les rythmes,

(1) Ce rapport s'appuie sur la réflexion d'un groupe de travail, voir les remerciements.

(2) Auxquels il faut ajouter la vapeur d'eau dont la concentration joue un rôle très important. Cependant, la vapeur d'eau a une durée de vie courte dans l'atmosphère – sept jours environ – et apparaît plutôt comme une « rétroaction positive directe » (dépendant largement de la température) à l'effet des gaz à « longue vie » dans l'atmosphère.

à la marge d'un scénario donné, de sa migration hors atmosphère⁽³⁾. La contribution de chacun des gaz à l'effet de serre dépend elle-même, à un moment donné, de sa concentration dans l'atmosphère multipliée par un coefficient de réchauffement global spécifique⁽⁴⁾. L'influence de chaque gaz est ainsi fonction à la fois de l'intensité de ses émissions passées, de sa contribution spécifique au réchauffement et de sa longévité. Notons déjà que le plus important des gaz à effet de serre, à la fois pour sa contribution totale au réchauffement et pour la forte irréversibilité de son accumulation est incontestablement le CO₂ : il contribue à environ trois quarts de l'accroissement actuel du pouvoir de réchauffement.

La concentration des gaz à effet de serre s'est considérablement accrue depuis les débuts de l'ère industrielle. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère a augmenté de 30 % : partant de 280 parties par million en volume (ppm), en 1750, elle est montée aujourd'hui à environ 370 ppm. La masse totale de carbone accumulée dans l'atmosphère sous forme de CO₂ pendant cette période passait de 590 gigatonnes de carbone (GtC) en 1765, à 609 GtC (correspondant à 286 ppm) en 1850, pour en arriver aujourd'hui à 785 GtC. En parallèle, la concentration de méthane a augmenté de 145 %. Pour retrouver de tels niveaux de concentration atmosphérique pour ces deux gaz, il faut remonter à plus de 400 000 ans en arrière. Mais autant que l'importance du changement de concentration, sa rapidité, moins de deux siècles, un instant à l'échelle des temps géologiques, est spectaculaire et inédite. La contribution de Jean-Baptiste, Duplessy, Ciais et Jouzel, sous forme de complément à ce rapport apporte des informations approfondies sur le phénomène.

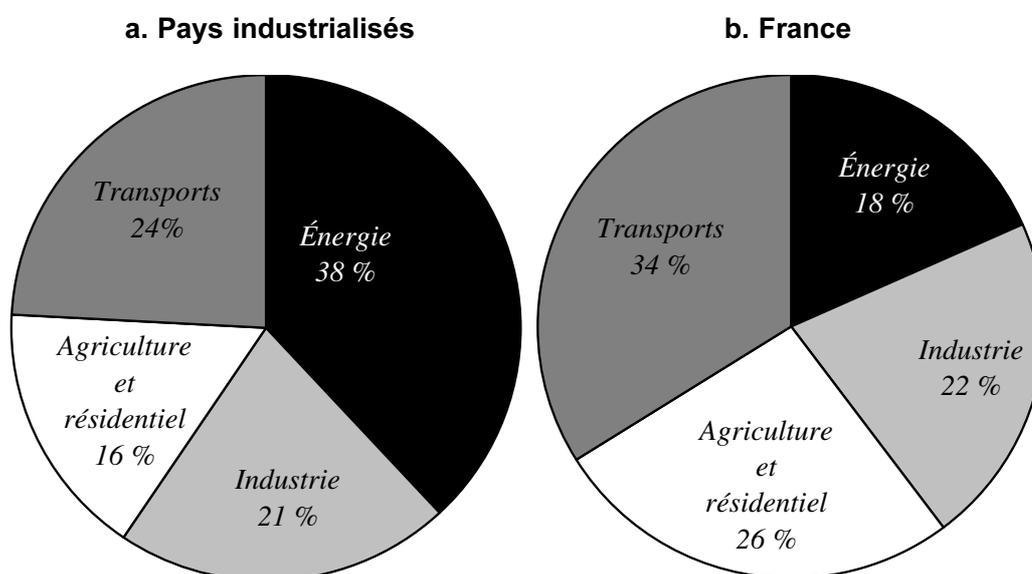
Cet accroissement de la concentration des gaz à effet de serre est clairement lié à l'activité humaine : ainsi, en 1990, pour les pays industrialisés, la production d'énergie, à hauteur de 38 %, le transport à hauteur de 24 %, les autres activités industrielles pour 21 %, l'habitat et l'agriculture pour 16 %, constituent les principales sources anthropiques d'émissions en dioxyde de carbone provenant de la combustion de carbone fossile⁽⁵⁾. Les activités agricoles contribuent de façon significative aux émissions de protoxyde d'azote et aussi de méthane (plus de 50 % du total, où viennent s'ajouter essentiellement les contributions des déchets).

(3) Sous l'hypothèse d'une décroissance exponentielle, la persistance est bien décrite par la demi durée de vie. Cette demi-durée de vie est faible pour le méthane (12 ans), plus longue pour le CO₂ (un siècle). Mais, ce dernier chiffre est d'interprétation délicate. Le taux de décroissance du CO₂ atmosphérique n'est pas immuable et invariant dans le temps : il reflète des mécanismes multiples d'ajustements progressifs des échanges, qui font varier notablement selon les scénarios les conditions d'équilibrage entre atmosphère et biosphère (voir le complément de Jean-Baptiste, Ciais, Duplessy et Jouzel dans ce rapport).

(4) L'indice GPW (*Global Warming Power*) qui mesure le pouvoir de réchauffement de chaque gaz, est de 1 pour le CO₂, de 21 pour le CH₄, de 310 pour le N₂O, de 23 900 pour le SF₆ et varie selon les gaz fluorés.

(5) La combustion des carburants fossiles fournit environ les trois quarts du CO₂ émis, le reste provenant essentiellement des modifications de l'usage de la terre. Les chiffres se réfèrent aux émissions imputables (contenu total en carbone des biens et services produits et utilisés en aval) et non aux émissions directes des secteurs.

1. Répartition par activités des émissions de CO₂ fossile en 1990



Source : UNFCCC, Inventaires nationaux 1990-1998.

Les graphiques 1a et b montrent l'origine des émissions CO₂ fossile pour les pays industrialisés et la France.

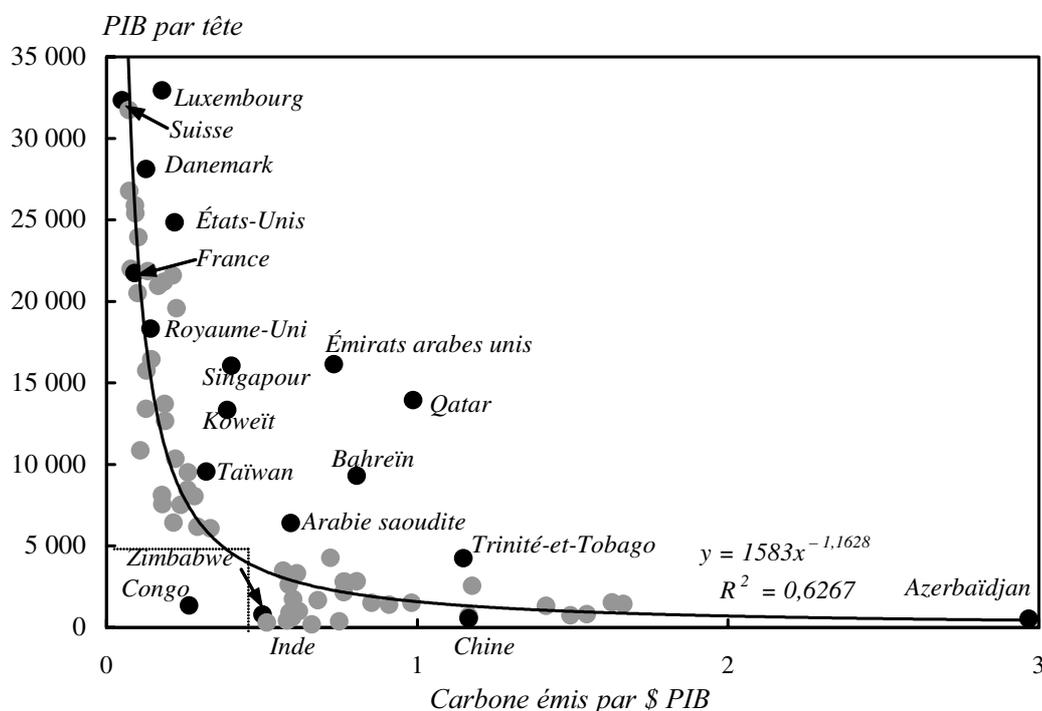
Le secteur des transports apparaît non seulement comme un émetteur parmi les plus importants mais aussi comme celui dont les émissions (directes) croissent spontanément le plus vite (plus de 15 % entre 1990 et 2000 en France).

Le total mondial des émissions annuelles de CO₂, exprimé en masse de carbone, était en 1990 de plus de 7 GtC, dont 6,3 GtC liées à l'énergie. La moyenne, plus d'une tonne par habitant, recouvre une grande dispersion des émissions par tête sur la planète : environ 6 tonnes pour les États-Unis, 2,3 tonnes pour l'Europe, et 1,7 tonne pour la France, qui possède un large parc nucléaire. En Inde, les émissions par habitant, sont environ seize fois moindre qu'aux États-Unis. La corrélation en coupe transversale du niveau de développement et de la quantité d'émissions indique que la poursuite du développement, et en particulier la croissance accélérée des PED les plus peuplés, entre autres la Chine, l'Inde et le Brésil, est susceptible d'accroître rapidement, toutes choses égales par ailleurs, le niveau des émissions.

En l'absence de politique volontaire de réduction, les scénarios au fil de l'eau (« les affaires comme d'habitude », ou « *business as usual* » dans le langage des négociateurs et des économistes, pour désigner une situation de référence sans action spécifique de lutte contre l'effet de serre) indiquent qu'un volume annuel d'émissions de 15 GtC de carbone pourrait être

dépassé vers 2030. Plus de 1 500 GtC pourraient être rejetées dans l'atmosphère pendant le XXI^e siècle, faisant passer la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone à plus de 800 ppm. L'analyse économique de l'effet de serre, comme peut être le simple bon sens le suggère, fait jouer un rôle important à sa réversibilité : jusqu'à quel point la concentration des GES atteinte à un moment donné est-elle réversible ? On l'a déjà noté, la réponse est différente selon que l'on considère le méthane, dont la durée de vie est courte, et le dioxyde de carbone. Retenons pour le second, que le long d'une trajectoire à concentration stabilisée au niveau actuel, sur 100 grammes de CO₂ émis aujourd'hui, 13 grammes seraient toujours dans l'atmosphère dans 1 000 ans. Et si l'on arrêtait toute émission aujourd'hui, le taux de concentration de CO₂ pourrait revenir à son niveau préindustriel seulement dans plusieurs millénaires. La réversibilité des concentrations en dioxyde de carbone⁽⁶⁾ est donc extrêmement lente. En fait, aujourd'hui, sous les hypothèses les plus optimistes, des concentrations nettement inférieures à 400 ppm, à horizon de quelques siècles, sont sans doute hors d'atteinte, sauf révolution scientifique qui permettrait le pompage à grande échelle du carbone contenu dans l'atmosphère.

2. Émissions de CO₂ en fonction du produit intérieur brut

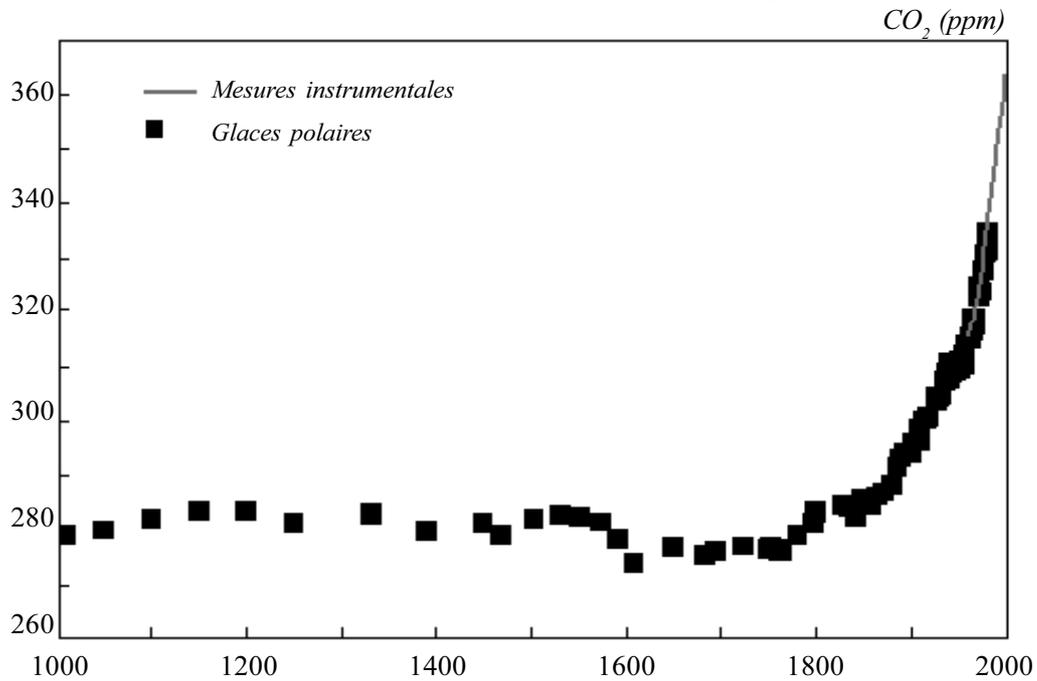


Source : Bernard (2001).

(6) La réversibilité climatique est une question distincte qui sera abordée plus loin.

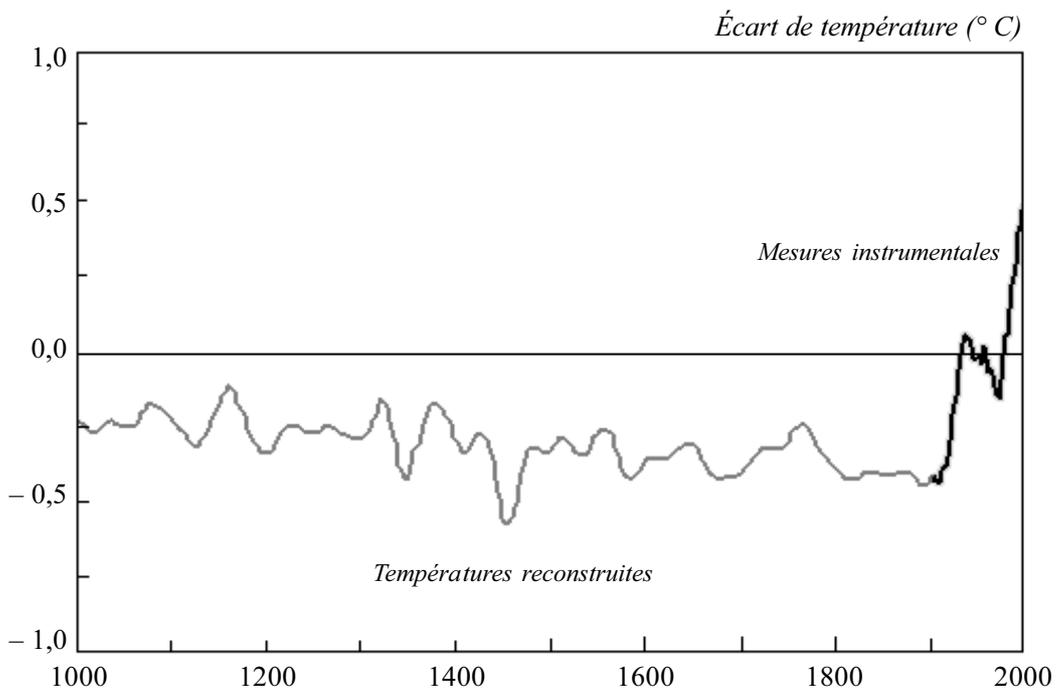
3. Évolution au cours du dernier millénaire

a. De la teneur atmosphérique en CO₂



Sources : Etheridge et al., 1996 et Keeling et Whorf, 1998.

b. De la température moyenne de l'hémisphère nord



Source : GIEC, 2001a.

1.2. Gaz à effet de serre et changement climatique

Les lois physiques élémentaires du phénomène d'effet de serre atmosphérique suggèrent que l'accroissement de la concentration des GES s'accompagne d'une élévation de la température de l'atmosphère. À cette observation fait écho la corrélation étroite établie à partir de carottages glaciaires entre teneur en CO₂, CH₄, et température sur plusieurs centaines de milliers d'années. L'hypothèse de l'actualité d'un scénario contemporain de changement climatique, accréditée par les lois élémentaires de la physique, est renforcée par *le parallélisme troublant de la croissance des concentrations de GES et de la montée observée de la température moyenne sur la planète, qui s'est accrue de 0,4 à 0,8 degré depuis 1850*. Les graphiques 3a et b illustrent de façon spectaculaire ce phénomène.

Mais l'interprétation de la corrélation est sujette à débat. D'une part, l'analyse détaillée de la causalité, par la simulation des effets à court terme d'un accroissement de concentration GES sur les climats du globe, est complexe et difficile. D'autre part, l'histoire à long terme du climat met en évidence des composantes périodiques dans une large gamme de « longueurs d'onde » : les oscillations à basse fréquence (à 20 000, 41 000 et 100 000 ans pour les glaciations) s'expliquent à partir des changements radiatifs relativement faibles qu'engendrent les modifications lentes des paramètres orbitaux de la Terre (théorie de Milankovich), tandis que les variations à court terme font intervenir les cycles de l'activité solaire, l'influence des poussières injectées dans la stratosphère par les grandes éruptions volcaniques, auxquelles se surimposent les modes propres de variabilité du système couplé océan-atmosphère. Cette variabilité naturelle accroît l'incertitude sur le poids de la composante d'origine anthropique dans les modifications de température intervenues depuis le début de l'ère industrielle. Cependant, invoquer l'argument pour justifier l'attentisme constitue, sauf à démontrer l'existence contemporaine d'une composante naturelle de la dérive climatique systématiquement positive, un raisonnement erroné ou au moins douteux. L'augmentation de température est une variable aléatoire, mais à moyenne donnée, *une incertitude accrue, que reflèterait par exemple une variance plus grande, augmente vraisemblablement, pour toutes les raisons qui ont été ou vont être données, les raisons d'agir vite*.

Face à ces données, la communauté des climatologues a pris la première la mesure de l'ampleur du problème et a contribué de façon décisive à donner l'alerte auprès des pouvoirs publics et de la société civile. Elle a joué un rôle essentiel dans la mobilisation internationale des énergies⁽⁷⁾. Celle-ci a

(7) Particulièrement au travers du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, ou en anglais IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change). Ce groupe a été créé en 1988, conjointement par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations unies pour l'environnement. Il a pour mission de rassembler les données scientifiques pertinentes, d'en favoriser la production et la diffusion, et d'en faire la synthèse critique. À partir de là, il lui revient également d'évaluer les incidences, écologiques et socio-économiques, des changements climatiques envisagés. Il lui incombe enfin de formuler et d'évaluer des stratégies possibles de prévention et d'adaptation. Ses rapports sont établis en toute indépendance scientifique, mais sous le regard vigilant des représentants officiels des gouvernements.

permis, depuis l'adoption de la Convention des Nations unies contre le changement climatique lors de la conférence de Rio (en 1992) la mise en place, puis aujourd'hui la ratification (vraisemblable) du Protocole de Kyoto (1997), mis en forme à La Haye (2000), Bonn et Marrakech (2001)⁽⁸⁾. Cette communauté scientifique a considérablement développé l'étude des conséquences climatiques de l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre. Les modèles se sont multipliés. En même temps qu'ils adoptaient des maillages horizontaux et verticaux de la terre des océans et de l'atmosphère de plus en plus serrés, ils prenaient mieux la mesure des échanges dynamiques entre biosphère et atmosphère, échanges qui gouvernent à la fois la stabilisation des concentrations et leurs effets sur les températures et les climats.

Aujourd'hui, presque tous les scientifiques spécialistes du climat dans le monde pensent que l'accroissement de la température moyenne du globe observé depuis 1850 s'explique pour une partie significative par l'accroissement des concentrations en GES dans l'atmosphère terrestre, accroissement pour l'essentiel d'origine anthropique. Les avis restent partagés sur la part expliquée et sur les relations précises de ce réchauffement et des événements climatiques récents comme la récurrence d'El Niño ou, depuis 1990, la multiplication d'années chaudes et l'accroissement de la fréquence des événements exceptionnels.

En ce qui concerne l'avenir, les relations entre émissions de GES et concentration d'une part, entre concentration et accroissement de température d'autre part, sont trop complexes pour que le diagnostic ne comporte pas une marge d'incertitude plus grande encore que dans l'explication du passé. De fait, le spectre des résultats sur le réchauffement climatique délivrés par les différents modèles est large. Leur degré de divergence sur le long terme est illustré par les *différences de pronostic, de 2,7 à 4,7 ° pour l'élévation de température moyenne à horizon 2100* pour un scénario d'émissions conduisant à une concentration de deux fois et demie celle de l'ère préindustrielle⁽⁹⁾. Dans le même scénario, la fourchette retenue pour la montée du niveau des mers va de 15 centimètres à plus d'un mètre.

(8) L'objectif ultime visé par la Convention des Nations unies 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 [...] dans un délai convenable pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement [...] que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable ».

(9) Ce sont les chiffres du scénario A2 du GIEC, conduisant à une concentration en CO₂ de 745 ppm. Le scénario A1, pour une concentration de 725 ppm en 2100, conduit à une fourchette de températures plus basse en 2100 (2,1 à 3,8 degrés), mais implique une stabilisation ultérieure à une valeur maximale proche, légèrement inférieure à 5 degrés. Dans un scénario bas d'émissions (550 ppm en 2100), la fourchette d'accroissement de température se situe entre 2,4 et 3,6 degrés. Pour un scénario pessimiste sur le contrôle des émissions, la température pourrait en 2100 s'accroître de 3,2 à 5,8 degrés.

Les différences ne font pas écho à une controverse scientifique sur les lois physico-chimiques fondamentales qui gouvernent la dynamique du climat. Elles reflètent les difficultés d'estimation de certains paramètres, les incertitudes sur la nature des couplages mettant en jeu l'atmosphère et la biosphère (comme l'effet du CO₂ sur la croissance de la biomasse), les contraintes de volume des calculs qui limitent le resserrement du maillage tridimensionnel, etc. Les instances scientifiques les plus crédibles ont avalisé sinon tel ou tel pronostic, du moins la scientificité des protocoles de modélisation adoptés, et l'honnêteté des résultats (voir en 2002, l'avis de la *National Academy of Sciences* américaine à la demande du Président Bush), écartant le soupçon parfois exprimé d'un message scientifique dicté par l'intérêt. Il n'en reste pas moins des avis dissidents dont il faut faire état. Les argumentaires critiques évoquent parfois l'existence d'une composante systématique négligée des variations climatiques (la périodicité du cycle des taches solaires) ou mettent en cause certains choix, qu'ils jugent à la fois insuffisamment fondés et trop consensuels dans le traitement de questions que les modèles ne peuvent cerner convenablement (formation des nuages dont l'étude requerrait un maillage plus serré, effet réfléchissant des particules). Ces opinions dissidentes suggèrent donc que la borne inférieure des évaluations des modèles (par exemple 2,7 degrés en 2100, dans le scénario évoqué précédemment) serait trop élevée⁽¹⁰⁾.

Ces réserves ne modifient sans doute que marginalement le constat. Même une probabilité plus faible de la borne supérieure de la fourchette des prédictions évoquées plus haut ne suffit pas à lever l'inquiétude : 5 degrés d'accroissement de la température moyenne entre 1850 et 2100 feraient refaire à la planète en deux siècles et demi *l'équivalent du chemin accompli depuis la dernière glaciation* (période qui s'est terminée il y a dix mille ans et pendant laquelle la température moyenne du globe était de 5 degrés inférieure à ce qu'elle est aujourd'hui et l'Europe était couverte de glaces). Une telle évolution pourrait déterminer des « surprises », que les climatologues n'excluent pas, sans se prononcer sur leurs formes exactes ou leur plausibilité. Le dégel éventuel du permafrost sibérien et la libération du méthane qu'il contient accéléreraient dramatiquement la concentration atmosphérique des GES dans l'atmosphère, menaçant plus encore, dans un cercle vicieux, de réduire la capacité d'absorption des océans. Les modifications de la circulation thermohaline dans l'océan Atlantique pourraient conduire à un changement de régime du Gulf Stream, qui en détourne le cours du nord de l'Europe au sud de l'Espagne. Notons que si le degré de plausibilité d'un tel scénario est controversé, et s'il ne semble pas d'actualité avant 2100, l'existence de deux « attracteurs » pour la dynamique des eaux profondes océa-

(10) Ces réserves sont exprimées avec pugnacité par Lomborg (2001). On peut arguer en sens inverse que la borne supérieure est trop faible, puisqu'elle ne tient pas compte de certains effets accélérateurs possibles comme le dégel du permafrost (qui, cependant, ne pourrait se manifester qu'après 2100).

niques n'est pas une vue de l'esprit mais un phénomène dont la récurrence – à l'échelle géologique – est semble-t-il établie. Il faut encore évoquer, à un horizon plus lointain et dans un registre beaucoup plus spéculatif, les scénarios d'économie fiction comme ceux de Magné et Moreaux (2002), qui supposant que dans plusieurs siècles l'ensemble des énergies fossiles, schistes bitumineux inclus, aura été exploité, les quelques 5 000 GtC rejetées dans l'atmosphère conduiraient à des concentrations de GES allant jusqu'à cinq fois le niveau préindustriel, c'est-à-dire dans des *terrae incognitae* redoutables pour la planète.

Passons sur cette parenthèse du très long terme pour revenir à l'essentiel. Les faits, sont, autant que faire se peut en la matière, avérés : *se prépare, selon un rythme incertain, probablement lent mais susceptible d'emballlements imprévus (certains scénarios de changements rapides ont été mis en évidence), un changement climatique inexorablement lié à une montée des concentrations GES à laquelle les activités humaines contribuent de façon décisive.*

1.3. L'action internationale

Autant la prise de conscience du phénomène a été lente, autant l'action collective internationale, celle envisagée dans la Convention cadre sur le changement climatique (1992) et le Protocole de Kyoto (1997), s'est mise en place dans des délais courts. Cette promptitude est assez remarquable si l'on prend en compte les extraordinaires difficultés d'une négociation planétaire sur un sujet neuf, les incontournables problèmes d'information, de communication, d'analyse qu'il a fallu résoudre, et les conflits d'intérêts qu'il a fallu surmonter pour en arriver là.

On peut évaluer l'ambition des objectifs retenus initialement à Kyoto pour les pays industriels (dits de « l'Annexe B », définie dans le glossaire), comme forte ou modeste selon le point de vue adopté.

1. Le Protocole de Kyoto

À la Conférence de Rio de Janeiro (juin 1992), en l'absence d'accord sur l'usage de l'instrument fiscal, la négociation s'est concentrée sur les émissions quantitatives de chaque pays. Elle a donc remis en cause le régime antérieur où le droit à rejeter des gaz à effet de serre, et donc à modifier le climat, était gratuit et illimité.

Le recours à un marché de droits, envisagé ensuite pour améliorer l'efficacité économique de l'arrangement, déconnecte les allocations initiales – à déterminer selon des critères censés faire un certain écho à l'équité – et finales – modifiées par les échanges économiques. L'allocation initiale comporte des enjeux distributifs importants et doit être établie sur des bases objectives. L'allocation initiale décidée par le Protocole de Kyoto (1997) est établie, de façon quelque peu arbitraire, en référence aux émissions de 1990. On peut imaginer dans l'avenir que la distribution des quotas initiaux se fasse en fonction d'une règle précisée (fonction des émissions, du PNB, du nombre d'habitants, par exemple).

Le Protocole de Kyoto répartit tout d'abord les quantités d'émissions autorisées sur la période 2008-2012, pour chaque pays en référence à ses émissions en 1990. Six gaz sont concernés et les objectifs sont spécifiés en équivalents d'émission de CO₂. Cet accord organise donc en quelque sorte une distribution gratuite aux gouvernements de permis d'émissions qui seront négociables sur un marché de permis dont les conférences des Parties ultérieures préciseront les modalités. Par exemple, les pénalités et sanctions nécessaires à un bon fonctionnement du marché, ont été introduites.

Ci-après les articles du protocole évoquant les échanges de droits :

- *Articles 3.1 et 4.* Les pays peuvent, au moment de la ratification du Protocole de Kyoto, définir une bulle, au sens où un groupe de pays s'engagent solidairement à respecter l'engagement quantitatif global, et se réservent donc le droit de répartir leurs engagements nationaux de façon différente. Au Conseil environnement de juin 1998, l'Union européenne a ainsi adopté une répartition intracommunautaire de l'effort qui n'est pas égalitaire en termes de pourcentages de réduction par référence à 1990. Chaque État membre se trouve ainsi doté d'une cible particulière, qui a été choisie en fonction des possibilités nationales de réduction et d'un compromis politique.

- *Article 3.13.* Possibilité, pour les parties de l'Annexe B^(*), de mise en réserve des quotas d'émission non utilisés sur la période 2008-2012.

- *Article 6.* Des crédits d'émission peuvent être attachés à des projets, sous certaines conditions. Les pays de l'Annexe B peuvent échanger ces crédits, mais peuvent aussi, sous leur responsabilité, autoriser des personnes morales (*legal entities*) à participer aux actions relatives à l'obtention et au transfert des réductions d'émission obtenues par ces projets. Ce mécanisme est baptisé mise en œuvre conjointe.

- *Article 12.* Le mécanisme de développement propre autorise, sous certaines conditions, les parties de l'Annexe B à réaliser des réductions « additionnelles » d'émissions dans les pays hors Annexe B (en gros, les pays en développement), plutôt que sur leur territoire national. Ces crédits pourront être acquis sur la période 2000-2007 et utilisés sur la période 2008-2012.

- *Article 17.* Le commerce des quotas d'émission entre parties de l'Annexe B est autorisé.

Les trois dernières dispositions sont souvent regroupées sous le label mécanismes de flexibilité.

(*) Voir la définition de l'Annexe B et de l'Annexe I dans le glossaire.

1. « Partage de la charge » européen

	Part des émissions en 1990 (% en équivalent CO ₂)	Évolution des émissions de 2000-1990 (%)	Objectif de Kyoto sous la bulle européenne (en 2008-2012 par rapport aux émissions de 1990) (%)
Allemagne	29,1	- 18,9	- 21
Autriche	1,8	3,1	- 13
Belgique	3,4	6,2	- 8
Danemark	1,6	- 1,2	- 21
Espagne	6,8	34,8	15
Finlande	1,8	- 4,1	0
France	13,1	- 1,7	0
Grèce	2,5	23,8	25
Irlande	1,3	24,0	13
Italie	12,4	4,1	- 7
Luxembourg	0,3	- 45,1	- 28
Pays-Bas	5,0	3,1	- 6
Portugal	1,5	30,1	27
Royaume-Uni	17,6	- 12,6	- 13
Suède	1,7	- 1,7	4
Total	100,0	- 3,5	- 8

Source : Ministère de l'Écologie et du Développement durable, D4E.

Réduire d'ici 2008-2012 les niveaux d'émission d'environ 5 % par rapport aux niveaux de 1990, alors que le scénario au fil de l'eau aurait conduit à un accroissement de plus de 20 %, constituait une ambition significative, et dont le coût, on le verra plus tard, n'est pas négligeable pour les pays industriels.

Mais l'action, et à cet égard elle est modeste, ne conduit qu'à un ralentissement de l'accroissement de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre : la réalisation des objectifs de Kyoto, avant le retrait américain, aurait conduit à un abaissement des concentrations en carbone de 384 à 382 ppm à la fin de la période d'engagement. Ce freinage doit être mis en perspective des exigences d'une stratégie visant à *la stabilisation temporaire des niveaux de concentration des GES en 2100*, qui exigerait une *diminution de 50 % des émissions dans quelques décennies*. Et cette stabilisation n'est soutenable à plus long terme que si les émissions sont ramenées finalement à quelques pour cent des niveaux actuels.

L'Union européenne, Partie au Protocole, s'est engagée quant à elle à une réduction de 8 % de ses émissions pour la période 2008-2012 par rapport à 1990, et a réparti l'effort entre ses États membres dans le cadre d'un système communément appelé la « bulle européenne », lors du Conseil des ministres de l'Environnement à Luxembourg en 1998. La France doit revenir pour la période 2008-2012 au niveau de ses émissions de 1990⁽¹¹⁾.

2. L'économie de l'effet de serre : un bilan coûts-avantages

La qualité du climat est, au sens large du terme, un bien économique. La stratégie de lutte contre les effets climatiques des gaz à effets de serre peut, et doit, donc s'appuyer sur le corpus du savoir économique. Il s'agit ici de mobiliser les concepts utiles et les résultats accumulés, d'évaluer leur pertinence, afin d'organiser une sorte d'analyse coûts-avantages des politiques de la maîtrise du changement climatique.

2.1. Le climat, bien collectif global

La « qualité » du climat de la Terre s'impose à tous : c'est donc à supposer qu'on sache la définir, un bien collectif *pur*. Si l'on en juge par l'étendue du « concernement collectif » qu'elle induit, c'est l'archétype du *bien collectif global*. Mais la qualité du climat n'est pas un concept directement opératoire. La concentration des gaz à effet de serre sera prise comme variable pertinente du raisonnement. L'accroissement (respectivement, la diminution) de cette concentration est un mal (respectivement, un bien) collectif pur et global. Notons que cette définition fait sens parce que la diffusion des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est suffisamment rapide (elle est de quelques jours pour le dioxyde de carbone) pour que les effets climatiques des émissions soient indépendants de leur localisation.

(11) Les émissions pour les six gaz concernés par le Protocole de Kyoto, étaient de 144 millions de tonnes d'équivalent carbone (MteC) en 1990 (soit 525 MteCO₂). Les mesures de réduction déjà décidées avant 2000 permettent d'envisager un niveau de 160 MteC en 2010, soit 16 MteC au-dessus du niveau de 1990. Ces mesures prennent en compte notamment en matière de transports, les conséquences de l'accord de réduction des émissions unitaires de CO₂ par les voitures particulières passé entre l'ACEA (Association des constructeurs européens d'automobiles) et l'Union européenne, ainsi que les conséquences des actions de maîtrise du trafic automobile en ville dans le cadre des plans de déplacements urbains. Il convient en outre de souligner que cette estimation a été faite sous l'hypothèse d'une croissance économique de 2,2 % par an au cours de la prochaine décennie. Avec une croissance de 2,8 % par an, le niveau d'émissions estimé s'élèverait à 171 MteC (chiffres issus du document de la Mission interministérielle de l'effet de serre, MIES, intitulé « Programme national de lutte contre le changement climatique 2000-2010 », Paris, janvier 2000).

2. Bien collectif, consentement à payer

Pour les économistes, un bien collectif pur, ou bien public pur, a les caractéristiques que Victor Hugo attribue à l'amour de sa mère : « chacun en a sa part et tous l'ont tout entier ». Chacun en a sa part, c'est-à-dire qu'on ne peut exclure quiconque de l'usage et tous l'ont tout entier, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rivalité pour sa consommation : ma consommation ne le détruit pas et n'interdit pas sa consommation par quiconque. Ces caractéristiques opposent le bien collectif pur au bien privé, qui est détruit par un usage individuel, nécessairement exclusif : un seul en a sa part, un seul l'a tout entier.

La qualité du climat, dès lors que l'on peut la définir est un bien collectif pur global : il concerne, à la différence des biens publics locaux, l'humanité toute entière. Symétriquement, la concentration des gaz à effet de serre est au moins dans certaines zones de concentration un mal collectif global.

L'analyse oppose les conditions d'une bonne allocation des ressources, selon la nature du bien. Les règles simplifiées de « premier rang » qu'elle souligne : disposition (marginale) à payer égale au coût (marginal) de production pour le bien privé ; somme, étendue à l'ensemble des agents, des dispositions à payer égale au coût (marginal) de production pour le bien collectif, reflètent de façon « duale » la nature des contraintes de rareté (somme des consommations plus petite que production pour le bien privé, consommation par chaque individu plus petite que production, pour le bien collectif).

Dans le cas de l'effet de serre ce que l'on appelle ici disposition à payer dans le langage abstrait de la théorie économique n'est autre, par exemple pour un pays, que la valeur des dommages subis et à subir par ce pays, du fait des changements climatiques.

Mais à niveau donné de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la variabilité géographique et temporelle de ses incidences climatiques doit être réintroduite : un réchauffement moyen donné de la planète s'accompagne d'une dispersion de changements de température qui peut être grande, comme le soulignent Jean-Baptiste, Ciais, Duplessy et Jouzel dans leur complément à ce rapport. Pour un même scénario de concentration en CO₂, pour une moyenne de 2 degrés, les niveaux de réchauffement sont de 2 à 3 °C sur l'Europe océanique et de 4 à 5° C en Sibérie orientale. Il faudra conserver à l'esprit cette dispersion quand viendra la discussion des risques associés au réchauffement et aussi se souvenir qu'un réchauffement donné, même modéré, peut avoir à la fois des conséquences catastrophiques pour certains – le « Bangladesh » –, et mineures voire bénéfiques pour d'autres – les agriculteurs nord américains et la « Sibérie ». Dans le jargon économique, les « consentements à payer »⁽¹²⁾ (c'est-à-dire

(12) Ou si l'on préfère, « disposition (marginale) à payer ». Ce vocabulaire technique ne préjuge pas des méthodes de la politique environnementale et n'implique aucunement que les pollués, parce qu'ils ont un « consentement à payer », au sens précédent du terme, devraient payer.

le négatif des dommages ou pertes de bien-être subies, telles qu'évaluées par les acteurs concernés) pour la réduction de la concentration de GES, sont extrêmement variables à la fois dans l'espace et dans le temps. La référence aux dimensions spatiales et temporelles du problème conduit à revenir sur les acteurs. Non tant pour affiner l'analyse spatiale, passer de la nation à ses provinces – la Floride contre le Montana ou le Vexin contre le Vaucluse – que pour souligner sa dimension temporelle. Les acteurs économiques dont nous avons à mesurer le consentement à payer ne sont, pour la plupart, pas encore nés. *Les bénéfices de tout programme conséquent de lutte contre l'effet de serre sont variables dans l'espace et diffus dans le temps.* C'est une difficulté essentielle à laquelle est confrontée la conception des politiques de lutte contre l'effet de serre.

Le cadre intellectuel de la réflexion mis en place dicte le plan : comment évaluer les dommages du changement climatique, ou dit autrement, comment évaluer les bénéfices d'une politique de maîtrise du changement climatique ? Comment aussi en évaluer les coûts ? Nous traiterons ces questions en commençant par la seconde.

2.2. La maîtrise de l'effet de serre : la nature des coûts

On évoquera ultérieurement les leviers d'action à long terme dont l'analyse repose sur l'examen des innovations technologiques à venir, dont les coûts de développement, les dates de mise en œuvre, mais aussi les performances sont entachées d'incertitude. On connaît beaucoup mieux les coûts à court et moyen termes, disons ceux qui sont pertinents pour la première phase Kyoto, 2010, jusqu'à 2020-2030.

La réduction des émissions des gaz à effet de serre peut être obtenue de trois manières différentes :

- par amélioration des techniques existantes pour limiter les émissions qu'elles engendrent, par exemple par l'accroissement de l'efficacité énergétique des équipements (qui pour une opération donnée réduit la quantité d'énergie requise), la réduction des fuites de méthane lors de son transport, ou, à une autre échelle, le développement des technologies entièrement nouvelles de séquestration du carbone ;

- par un nouvel arrangement, au sein d'un secteur, des techniques existantes, substituant partiellement les moins polluantes aux plus polluantes. On peut ainsi produire de l'électricité en utilisant plus massivement le nucléaire ou encore les énergies renouvelables, dont il est prévu qu'elles contribueront en 2020 à 20 % de la production d'énergie en Europe (voir le complément à ce rapport rédigé par Bal, Moisan et Morcheoine qui fait le point sur les énergies renouvelables). Ou bien encore en passant, au sein des carburants fossiles, du charbon au gaz, ce qui, comme le montre le tableau 2, réduit d'environ 40 % les émissions de carbone ;

- par l'incitation au basculement de la demande finale, en jouant sur le système des prix au niveau du secteur de la consommation, vers des produits dont la production est moins polluante.

2. Contenu en carbone des divers combustibles

	Tonne de carbone / 10 ¹² Joules
Lignite	27,6
Charbon	25,8
Pétrole	20,0
Essence	18,9
Gaz naturel liquéfié	17,2
Gaz naturel	15,3

Source : GIEC (1996).

L'appréhension des coûts du premier type relève d'études microéconomiques, par exemple au niveau de l'entreprise. Le rapport du groupe de travail 3 du GIEC présente une galerie complète des grandes catégories d'innovations susceptibles d'améliorer l'efficacité énergétique dans le secteur de l'industrie de l'habitat et des transports (GIEC, 2001).

L'étude des seconds types de coûts est aussi éclairée par des modélisations sectorielles, ou « mésoéconomiques », dont l'archétype est la modélisation du secteur de production de l'électricité, au sein duquel les conditions de substitution entre techniques et intensité des réponses à une modification du système de prix sont bien comprises.

L'étude des troisièmes types de coûts passe par la prise en compte des comportements des agents finaux.

Ces études peuvent être conduites d'abord indépendamment, puis synthétisées soit dans un cadre d'équilibre partiel, où, par exemple, la demande d'énergie restera exogène, soit dans les cadres que mettent en place les modèles d'équilibre général calculables. Le complément à ce rapport, rédigé par Criqui, Vielle et Viguié, fait une présentation comparée d'une galerie de modèles, qui relèvent des rubriques méso et macroéconomiques. Leurs résultats fournissent les meilleures estimations agrégées des coûts dont nous disposons. Avant d'en présenter un résumé, il est utile de faire un certain nombre d'observations « transversales ».

Remarquons d'abord que les techniques de réduction des émissions au niveau de l'entreprise sont mises en œuvre en passant du moins coûteux au plus coûteux. La substitution des techniques dans le secteur de production d'électricité se fait aussi normalement selon le même principe de telle sorte que les coûts marginaux de réduction correspondant aux deux premières

catégories ci-dessus sont croissants⁽¹³⁾. On peut penser qu'il en ira de même pour les coûts macroéconomiques de la troisième catégorie. On pourrait donc tracer une (des) courbe(s) de coût marginal de réduction, croissante(s) comme dans les manuels d'économie.

3. Coût marginal, réduction et taxe carbone fictive

On peut tracer, par exemple pour un pays, la courbe qui visualise le coût total de réduction des émissions en fonction de la quantité des émissions réduites (on dit parfois, par anglicisme, le coût d'abattement en fonction de la quantité abattue), ou encore en fonction du pourcentage de réduction par rapport à la situation initiale. Il est souvent plus éclairant de visualiser la courbe de coût marginal qui s'en déduit, et qui est généralement croissante. Le coût total, on le verra, peut être mesuré différemment.

La théorie économique du « premier rang » enseigne que, pour un mode de réduction (par exemple, limité aux réductions de CO₂) convenablement défini dans une économie donnée, l'imposition d'une taxe carbone dont l'assiette serait l'émission de CO₂ et qui serait convenablement répercutée sur tous les agents économiques émetteurs conduirait à un niveau d'émission tel que le coût marginal social égale la « taxe carbone ».

La littérature retient souvent la correspondance, ici biunivoque, entre le prix ou le « taux de la taxe carbone » et le niveau de réduction total. On y fera également référence ici.

Pour plus d'information sur les points évoqués ici, le lecteur se référera au complément de Criqui, Vielle et Viguier.

Les coûts, totaux ou marginaux, peuvent-ils être négatifs ? L'argumentaire, dit du « double dividende », qui suggère une réponse positive, mérite examen, tant du point de vue microéconomique que du point de vue de l'économie toute entière.

Tout d'abord, au niveau microéconomique, le rapport du GIEC souligne que bon nombre d'investissements efficaces pour la politique environnementale peuvent être effectués à coût nul voire négatif. Ce sont les mesures sans regrets, dont la rentabilité est positive, toute considération d'effet de serre mise à part : elles rejettent moins de carbone tout en étant moins chères⁽¹⁴⁾. Mais l'optimisme des ingénieurs, et le « double dividende »

(13) Il pourrait en aller différemment dans le moyen-long terme.

(14) Pour le GIEC, ces techniques pourraient suffire à effectuer la moitié des réductions nécessaires en 2020 pour stabiliser les émissions au niveau de 1990.

microéconomique qu'il suggère, apparaît généralement suspect aux économistes. Il suppose souvent un déclassement techniquement justifiable, mais économiquement prématuré, des équipements existants. Il fait également trop abstraction des incertitudes sur les performances, et éventuellement de la difficulté de la transformation des méthodes de gestion (par exemple, dans la régulation du trafic urbain). S'il existe des sources potentielles de coûts négatifs, elles ne suffiront pas à faire des politiques climatiques ambitieuses des opérations à coût nul.

Faire basculer la demande finale des produits à contenu en dioxyde de carbone le plus élevé vers ceux où il est le moins élevé, est une autre manière de réduire les émissions globales. Même en l'absence de mesures dans le secteur productif, une fiscalité « à la consommation »⁽¹⁵⁾ pénalisant les produits à fort contenu en carbone incite, en modifiant les prix relatifs, à un tel basculement. Sous l'hypothèse d'une pression fiscale constante, une fiscalité carbone accrue permettra une baisse d'autres taxes de telle sorte que le bien-être (agrégé) des consommateurs ne sera, en première approximation pas affecté. Cette combinaison de mesures permet donc, tant qu'elle s'applique sur un registre modéré, d'obtenir des réductions d'émissions à un coût social (presque) nul. C'est, semble-t-il, la forme correcte de l'argument du « double dividende » macroéconomique. La forme populaire et militante de l'argument suggère que l'allègement, en contrepartie de l'accroissement de la taxe carbone, de taxes judicieusement choisies, procure des bénéfices sociaux nets strictement positifs. Elle ne peut avoir qu'une validité occasionnelle, quand le réexamen de l'ensemble fiscal est l'occasion de faire réapparaître des « inefficacités » auxquelles on aurait dû antérieurement remédier ou qu'il faut de toute façon corriger⁽¹⁶⁾. Les réserves ainsi exprimées sur la plausibilité et l'importance du « double dividende » ne doivent pas être mal comprises : la mise en place d'une fiscalité carbone significative ouvre des possibilités de substitution entre les nouvelles recettes et les anciennes. Elle donne ainsi nécessairement à la question de la réforme fiscale une place, et une certaine priorité, dans l'agenda politique.

Pour en terminer avec les coûts à court et moyen termes, il faut indiquer que les modèles d'équilibre général qui ont une couverture internationale font apparaître un troisième type de *coût* qui a le mérite d'être négatif, c'est-à-dire *en fait un gain*. En effet la lutte contre l'effet de serre, qui réduit la demande et donc le prix de l'énergie mondiale, est bénéfique pour

(15) C'est-à-dire des taxes type TVA qui n'affectent pas le système des prix à la production (qui diffèrent donc des « accises »).

(16) De telles inefficacités sont patentées dans certains cas de subventions énergétiques non fondées. Certains arguments plaident en faveur d'un déplacement de la fiscalité du travail vers la pollution en Europe. Ils doivent cependant faire l'objet d'études spécifiques, dans des modèles adaptés à l'étude de la fiscalité optimale ou de la réforme. Ces études conduiront à des conclusions qui seront d'autant plus crédibles qu'elles ne prétendront pas traiter simultanément les deux problèmes de l'évaluation de la fiscalité générale et celui de l'optimisation de la politique climatique.

une entité importatrice comme la France. Cet effet n'est *ni anecdotique, ni spécifique au court terme* : il fait écho à une tendance lourde des politiques de lutte contre l'effet de serre celle de la réduction de la rente des pays producteurs de carburants fossiles et de son transfert partiel aux États consommateurs.

Toutes ces études font abstraction de ce que l'on pourrait appeler les coûts «macroéconomiques» de très court terme, qui reflètent les difficultés d'ajustements des prix ou des anticipations des agents et qui sont mesurés, selon des logiques parfois différentes, par les grands modèles macroéconomiques d'inspiration keynésienne. Ces coûts, en particulier pour des changements rapides et non anticipés, comme l'a été au début des années soixante-dix le premier choc pétrolier, peuvent être importants. Ils devraient rester mineurs pour le problème qui nous occupe, du moins si les politiques sont introduites dans le cadre de *transitions douces* (ce point sera discuté longuement plus loin).

2.3. La maîtrise de l'effet de serre : évaluation des coûts agrégés

Ces remarques préliminaires faites, il faut tenter d'obtenir une évaluation synthétique du coût de moyen terme (une perte de surplus, dans les termes du calcul économique), en pourcentage du PIB pour donner un ordre de grandeur compréhensible. Combien aurait coûté aux États-Unis, au Canada, à la France et à l'Union européenne, pour les trois premiers types de coûts évoqués ici, la mise en œuvre du Protocole de Kyoto, par exemple s'il n'était pas fait recours aux mécanismes de flexibilité ?

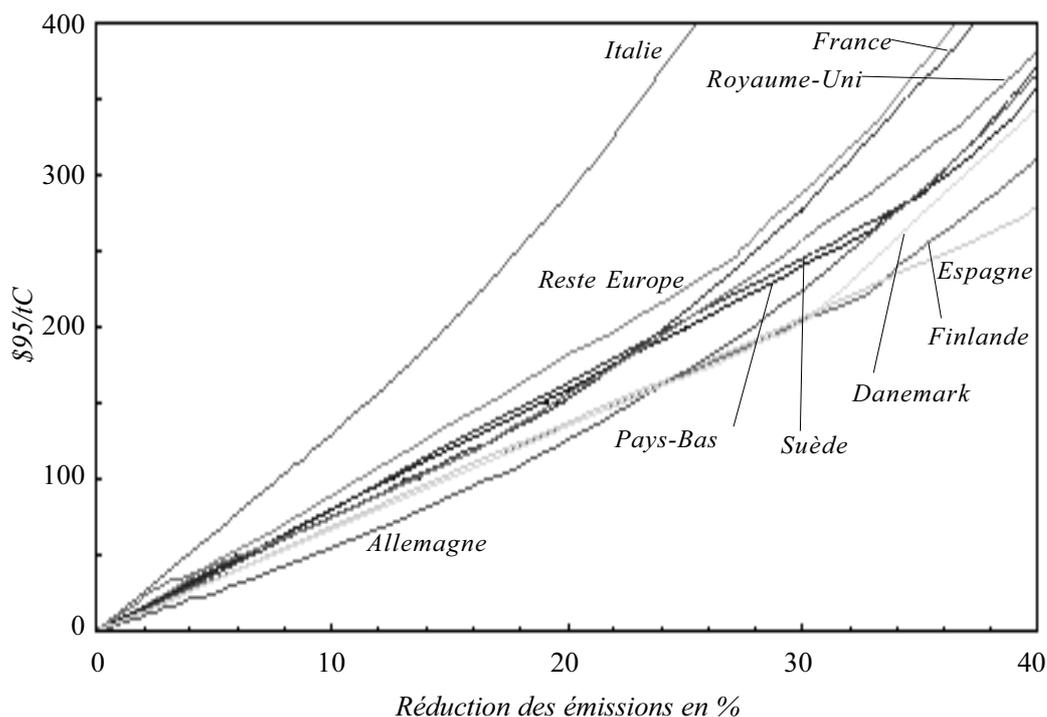
Des études agrègent les trois types de coûts évoqués précédemment, pour mettre en évidence une courbe de coût marginal de réduction fonction de la « quantité réduite ». Elles sont souvent lues en renversant l'ordre des axes, selon la logique évoquée dans l'encadré précédent, quantité « réduite » fonction de la « taxe carbone fictive ».

Le graphique 4, tiré des travaux comparatifs menés par Criqui, Vielle et Viguiier dans leur complément à ce rapport, indique les coûts marginaux de réduction sur la période Kyoto, à partir de simulations du modèle l'EPPA mis au point au Massachusetts Institute of Technology.

Si l'on passe d'un modèle particulier comme EPPA à l'ensemble des modèles existants, le spectre des estimations de coûts de Kyoto par pays, est assez large. Les différences ont essentiellement trois sources : les mesures hétérogènes du coût social, reflétant la variabilité de la procédure d'évaluation (équilibre partiel ou équilibre général) ou la nature du coût retenu (perte de PIB ou bien surplus) ; les incertitudes sur les émissions dans le scénario de référence 2010 ; l'incertitude sur les courbes de réduction elles-mêmes. L'hétérogénéité des résultats est illustrée par la comparaison des coûts marginaux de réduction, associés aux objectifs du Protocole de

Kyoto sans flexibilité, et calculés à l'aide de dix modèles. Pour les États-Unis les coûts marginaux se situent entre 50 et plus de 400 dollars, avec une concentration dans la zone 130-260 dollars, et une moyenne de l'ordre de 195 dollars⁽¹⁷⁾.

4. Valeur de la tonne de carbone en fonction du pourcentage de réduction des émissions



Source : Weyant et Hill (1999).

Comment passer de ces courbes à l'évaluation de coûts agrégés ? Esquissions ici un raisonnement grossier mais qui permet de relier les ordres de grandeur des taxes carbone du graphique précédent et les coûts en PIB. Prenons pour coût de réduction permettant la réalisation des objectifs de Kyoto, en l'absence de mécanismes de flexibilité, 200 dollars la tonne de carbone pour les États-Unis, chiffre se situant dans la moyenne des évaluations par les modèles existants. Le pourcentage de réduction prévu dans le Protocole, par rapport au scénario au fil de l'eau était de un peu plus de 30 % pour les États-Unis, soit de l'ordre de 2 tonnes par habitant. En admettant que le coût marginal de réduction reflète bien le coût marginal social et que

(17) Rapporté dans Weyant et Hill (1999). Les différences dans les chiffres comparés intègrent une incertitude sur les émissions de référence en 2010, mais cet élément semble moins peser que l'incertitude sur la forme des courbes de coûts : les réductions requises par Kyoto sur l'ensemble de l'Annexe B sont estimées entre 557 et 1 047 MtC, avec une moyenne de 657 MtC et un écart-type de 157 MtC. Les chiffres donnés pour les États-Unis intègrent des pourcentages requis de réduction variant entre moins de 25 et plus de 31 %.

le coût marginal est croissant linéairement (fonction de coût quadratique), le coût par tête peut être évalué à $(200/2)^2$, soit 200 dollars par habitant, pour les États-Unis, soit environ 0,65 % du PIB par tête, qui est d'environ 30 000 dollars. C'est un chiffre voisin qui est retenu par le modèle EPPA⁽¹⁸⁾. Il s'agit dans la logique considérée⁽¹⁹⁾ d'un prélèvement permanent sur la période, mais qui n'est pas censé affecter le taux de croissance de l'économie.

Les tableaux 3a et b présentent les résultats d'une analyse moins simpliste des coûts totaux de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto en 2010 (sans mécanisme de flexibilité), pour les États-Unis et la France. Ils mettent en exergue les résultats obtenus à partir des modèles EPPA, GEMINI-E3 et POLES, modèles et résultats que le complément de Criqui, Vielle et Viguiier, présente de façon plus approfondie.

3. Décomposition du coût de mise en œuvre du Protocole de Kyoto sans mécanisme de flexibilité en 2010

a. États-Unis

	EPPA	GEMINI-E3	POLES
Baisse d'émissions (en MtC)	540	517	476
Baisse d'émission par rapport au fil de l'eau en 2010	- 29,8 %	- 28,9 %	- 27,7 %
Taxe sur le carbone (en \$95)	229	161	145
Coût direct (b\$95)	- 45	- 30,7	- 29,6
Réduction du PIB par rapport au fil de l'eau en 2010	- 1,0 %	- 0,4 %	
Pertes de surplus (EV %)	- 0,49		
Surplus (en Mds\$95)	- 49	- 37,4	

b. France

	EPPA	GEMINI-E3	POLES
Baisse d'émissions (en MtC)	20,3	19,2	17,0
Baisse d'émission par rapport au fil de l'eau en 2010	- 17,5 %	- 15,8 %	- 14,0 %
Taxe sur le carbone (en \$95)	136	237	185
Coût direct (b\$95)	- 1,23	- 1,9	- 1,35
Réduction du PIB par rapport au fil de l'eau en 2010	- 1,1 %	- 0,2 %	
Surplus (en Mds\$95)	- 12	- 0,7	

Source : D'après Criqui, Vielle et Viguiier.

(18) Un raisonnement semblable appliqué à la France et à l'Union européenne conduirait à des résultats plus éloignés de ceux fournis par les modèles existants. Une des raisons en est que, dans les deux cas, la courbe des coûts marginaux, en tonne de carbone par tête est, dans une zone importante, nettement au-dessus de celle des États-Unis.

(19) Qui fait abstraction des gains en termes de l'échange, d'un côté, des pertes macroéconomiques de court terme, de l'autre.

Avec un marché de permis, la moyenne de baisse des coûts marginaux estimée à l'aide des dix modèles évoqués précédemment est de 72, 57 et 78 %, respectivement pour l'Europe, les États-Unis et le Japon. Ces chiffres suggèrent que le coût total pourrait être divisé par 1,5 ou 2 pour les États-Unis, et 2 ou 3 pour l'Union européenne ; une évaluation dont l'ordre de grandeur est confirmé par les trois modèles nourrissant les tableaux ci dessus.

Les émissions anthropiques de carbone peuvent donc dans un premier temps être réduites par une multitude d'actions techniques, comme celles visant à améliorer *l'efficacité énergétique* dans tous les domaines. Elles peuvent l'être également en combinant des actions modifiant la structure de la demande finale et des actions stimulant des substitutions techniques, dans le cas de la production d'électricité, soit en passant par exemple du charbon au gaz, soit en utilisant plus massivement les énergies renouvelables. La mise en œuvre de ces actions pour atteindre les objectifs du Protocole de Kyoto a alors un coût. Les études qui viennent d'être présentées l'évaluent, sous l'hypothèse de mise en place de mécanismes de flexibilité au sein de toute l'Annexe B, à quelques dixièmes de point de PIB. Il est naturel d'y voir, la logique des modèles le suggère, un prélèvement permanent sur la période qui n'affecte pas le taux de croissance de l'économie. Que la décarbonisation de l'économie n'affecte pas les taux de croissance à long terme est plausible, au sens où des arguments intuitifs peuvent être invoqués à l'appui des thèses opposées de l'accélération et de la décélération du progrès technique. L'approfondissement de la réflexion serait ici bienvenu⁽²⁰⁾. Que les mesures n'aient pas de conséquences négatives à court terme est optimiste⁽²¹⁾. La faiblesse des coûts d'ajustement macroéconomiques est d'autant plus plausible que les mesures seront annoncées à l'avance et mises en place dans le cadre de transitions douces. On y reviendra à la section 4 de ce rapport.

Qu'en est il à un *horizon plus lointain* ? À moyen terme, les actions immédiates qui viennent d'être évoquées peuvent être relayées par la mise à contribution massive du système des transports, par le développement de multiples innovations comme la co-génération et de la tri-génération (Meunier, 2002). Une énergie nucléaire classique, rendue plus sûre et/ou mieux acceptée, pourrait jouer un rôle important dans les pays développés même si son développement viendrait assez vite buter sur les ressources en uranium. Le nucléaire contribue à hauteur de 6,7 % aujourd'hui à la production mondiale d'électricité. Néanmoins, ces actions ne peuvent avoir que des effets limités, insuffisants pour stabiliser de façon autre que temporaire la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Les coûts à moyen-long terme sont donc plus incertains, tributaires de la vitesse de maturation des innovations techniques prometteuses, et ce d'autant plus que les objectifs de réduction sont ambitieux.

(20) Dans cette direction, voir Fougeyrollas *et al.* (2001).

(21) Thorning (2002) donne une vision particulièrement pessimiste de ces coûts.

Sur un horizon lointain, les calculs doivent introduire des hypothèses sur les courbes d'apprentissage qui, aussi étayées soient elles, resteront problématiques. Criqui, Vielle et Viguier suggèrent, dans le complément joint à ce rapport, qu'une réduction des émissions en 2050 à 50 % de leur valeur actuelle, pourrait coûter de 3 à 7 % de PIB mondial. Les travaux du GIEC, à partir de quatre modèles mondiaux de long terme, consacrés à l'étude du rythme optimal des réductions pour différents scénarios de référence, concluent à la plausibilité (hors prise en compte de la séquestration de carbone) de coûts souvent inférieurs à 2 % du PIB à cette échéance. Des coûts significativement supérieurs n'apparaîtraient que pour une cible de 450 ppm dans les scénarios de référence à forte croissance et forte intensité en carbone.

Notons qu'à plus long terme encore, comme l'illustrent les exercices à plusieurs siècles de Magne et Moreaux (2002), la taxation du carbone permet le transfert de la rente pétrolière, mais n'interdit aucunement l'épuisement des ressources pétrolières. Peut-être même n'en éloigne-t-elle pas le terme⁽²²⁾. En l'absence d'innovations techniques permettant de supplanter les carburants fossiles et d'actions résolues pour en rendre l'usage économiquement injustifié (innovations et actions si possible non anticipées par les producteurs !), le prolongement de l'exploitation d'une très grande partie des gisements d'énergie fossile connus ou à découvrir, éventuellement jusqu'à épuisement, resterait une menace potentielle⁽²³⁾.

2.4. L'évaluation des dommages dus au changement climatique

Maîtriser le changement climatique a pour objet d'éviter les dommages qu'il est susceptible de créer. Dans le calcul coûts-avantages des politiques de maîtrise du climat, la colonne « bénéfiques » n'est autre que le négatif de la colonne des coûts économiques du changement climatique. Ceci inclut d'abord les *coûts économiques proprement dits*. Entrent dans cette catégorie la détérioration du capital naturel support des activités productives (agriculture, sylviculture, pêche), les effets sur les activités touristiques (sports d'hiver), les effets sur l'abondance et la qualité des ressources en eau. On peut aussi citer les pertes ou les délocalisations de production agricole di-

(22) Parmi les résultats de Magné et Moreaux, on peut noter des scénarios amenant, malgré une taxe sur les émissions, à l'épuisement complet du stock de pétrole, et à l'utilisation du charbon sur plusieurs siècles, en particulier si des progrès techniques sont réalisés dans son extraction et sa conversion. Un autre résultat *a priori* contre-intuitif est la possibilité qu'un progrès technique important sur l'énergie solaire amène à extraire plus rapidement le stock de charbon de qualité, dont la rente de rareté devient nulle. Ceci, paradoxalement se traduirait par des émissions de CO₂ accrues sur les deux prochains siècles. Il faut noter pour apprécier l'intérêt et les limites de l'exercice, que les forces qui déterminent la dynamique de court terme des prix pétroliers ne permettent aux effets de long terme de se manifester que très lentement, et pourraient même les contrecarrer sur longue période.

(23) Cette « mauvaise nouvelle » doit être relativisée par le fait que l'épuisement de tout le pétrole et gaz conventionnel est compatible avec une stabilisation de la concentration à 450 ppm.

rectement imputables aux modifications climatiques, ou bien les dégâts matériels supplémentaires infligés aux biens et personnes et liés à la multiplication probable des événements extrêmes. Ceci inclut également les *coûts d'adaptation* (protection des côtes, climatisation) permettant de limiter les effets négatifs des modifications du climat. Tous ces coûts directs et ces coûts d'adaptation dépendront non seulement de l'importance mais aussi de la rapidité du changement climatique. Interviennent également les coûts économiques et sociaux dus aux *délocalisations des équipements et aux migrations* humaines que des changements climatiques majeurs susciteraient. L'accélération de l'obsolescence du capital productif (infrastructures et implantations humaines dans les zones côtières), peut aussi relever des coûts de délocalisation. Il faut aussi mentionner les *pertes écologiques* liées par exemple aux effets inquiétants que pourrait avoir le changement climatique sur les zones tropicales. Enfin, sont particulièrement importants les *coûts sanitaires* (les migrations de virus dangereux sont ainsi une des sources potentielles de graves perturbations sanitaires dont la plausibilité est difficile à apprécier), mais aussi les *pertes d'aménité, de bien-être, de confort*, que la détérioration climatique à un endroit donné engendre pour ses habitants. Ces catégories sont inventoriées avec plus de détail dans le complément à ce rapport rédigé par Ambrosi et Hourcade.

L'évaluation marchande de ces différents coûts, à un moment donné et pour une chronique d'émission donnée de GES, est un sujet particulièrement délicat que le complément discute de façon plus exhaustive. Retenons ici que si la mesure économique des premiers types de coûts peut être difficile et incertaine elle ne pose pas de questions de principe. Aussi, l'indexation des dégâts liés aux événements extrêmes à la valeur du capital et donc à la richesse de la société n'est pas problématique. Les méthodes traditionnelles (valorisation marchande à partir de l'examen des valeurs foncières et des choix de localisation, de voyage...) ne sont que d'un secours modeste pour l'évaluation des pertes d'aménité de bien-être et de confort, puisque les données disponibles aujourd'hui ne sont que difficilement extrapolables à un avenir lointain. La difficulté est exacerbée quand on passe à la valorisation des coûts économiques et sociaux comme les migrations, puis à celle des pertes écologiques. Comment évaluer la souffrance d'éventuels « réfugiés du changement climatique » et/ou les difficultés de ceux contraints de les accueillir dans des conditions difficiles ? Comment valoriser le dommage causé à nos descendants par la disparition éventuelle des récifs coralliens, et celui, moins hypothétique, de l'accélération de l'extinction d'espèces animales ou végétales ?

Les ordres de grandeur avancés dans les rares études économiques existantes (1 à 2 % par an du PIB mondial en 2100 pour les dommages agrégés ; dommages beaucoup plus forts – plus de 4 % de leur PIB – pour les pays en développement que pour les pays riches) doivent être interprétés avec prudence.

D'abord, en additionnant les coûts, supposés convenablement évalués, l'évaluation agrégée conduit sans doute à une *estimation marchande minorée*

des coûts sociaux. D'une part, la partie disproportionnée qui serait supportée par les pays en développement suggère une surpondération des coûts monétaires qu'ils supporteraient, du moins si le calcul économique reflète une aversion à l'inégalité⁽²⁴⁾. D'autre part, et l'argument est le jumeau du précédent, les coûts agrégés calculés constituent des « équivalents certains » qui ne mesurent les coûts sociaux que sous l'hypothèse que l'assurance pour les aléas climatiques est parfaite. Or, il n'existe aujourd'hui pratiquement aucun mécanisme d'assurance à l'échelle de la planète contre les aléas climatiques, même si certains risques individuels sont assurables. *L'absence de mécanismes d'assurance* accroît les coûts sociaux à prendre en compte dans le calcul économique (voir Gollier, 2001).

L'incertitude sur l'ampleur des effets, très vite croissante avec l'horizon temporel, rend particulièrement problématique le calcul et le choix d'équivalents certains des coûts. Revenons sur le scénario de modifications de la circulation thermohaline dans l'océan Atlantique conduisant à un changement de régime du Gulf Stream, qui en détournerait le cours du nord de l'Europe au sud de l'Espagne. Les effets pour l'Europe d'un tel phénomène restent très spéculatifs : deviendrait-elle plus froide alors que le reste du monde se réchaufferait ? *A fortiori*, toute tentative d'évaluation marchande sera plus spéculative encore⁽²⁵⁾.

Ces remarques n'épuisent pas les difficultés de traitement des dommages dans le calcul économique. Leur « actualisation », tout comme celle des coûts, mérite une discussion spécifique.

2.5. L'actualisation

La pondération intertemporelle des coûts et avantages est un problème classique, qui prend ici, avec l'horizon temporel exceptionnel du calcul, une importance décisive. Les pondérations retenues par le calcul économique dérivent classiquement aussi du choix d'un *taux d'actualisation*. Le complément à ce rapport rédigé par Hourcade et Lecocq en introduit plus longuement la problématique et discute l'application à l'effet de serre.

En fait le taux d'actualisation seul n'est pas suffisant pour guider les choix publics (ni d'ailleurs les choix privés). La doctrine des années soixante-dix du Commissariat général du Plan soulignait déjà que le taux d'actualisation était un élément central du système des prix intertemporel – c'est le ratio des prix du numéraire à deux périodes – mais n'en était qu'un des éléments. Elle rappelait qu'il fallait lui adjoindre pour le calcul économique le système des

(24) Bien sûr, on peut se demander si le poids ainsi donné à l'équité dans le calcul économique des aménités futures des pays pauvres, n'est pas en contradiction avec les poids implicites que nos politiques actuelles leur accordent : pourquoi dépenser beaucoup d'argent pour aider le Bangladesh en 2050, si on ne le fait pas aujourd'hui ?

(25) Et plus encore, comme on le verra, si cette tentative d'évaluation marchande pondère coûts et des probabilités qui, « subjectives » au sens de la théorie, le seraient, au sens courant du terme, inévitablement de plus en plus.

prix relatifs⁽²⁶⁾. Cette vision, que transmettent toutes les théories exigeantes des choix intertemporels, conduit ici à souligner que l'évaluation d'une amélioration climatique pour les générations ultérieures doit prendre en compte un glissement des prix relatifs le long d'un chemin donné de l'évolution climatique (au voisinage de la trajectoire optimisée où les coûts de production d'une amélioration climatique, tout comme les taux de croissance, sont endogènes, voir Boiteux, 1976, Henry, 2000 et Philibert, 1999). Ce glissement bien sûr ne sera pas le même pour les biens agricoles et pour ce que l'on appelle les aménités générales associées au climat. Pour les biens agricoles, on doit évaluer les changements de production (et de prix, in problème moins simple qu'on ne le croit généralement, voir Wood, 2001). Pour les aménités générales, il faut évaluer convenablement l'élasticité d'un « consentement à payer climatique » vis-à-vis de la richesse⁽²⁷⁾. Le recours à la procédure d'actualisation convenable, dès lors que l'élasticité évoquée est positive, diminuera le taux d'actualisation apparent – mesuré à partir d'une évaluation des avantages fondée sur les valeurs présentes des consentements à payer, et ce d'autant plus que la dite élasticité est élevée. Quelle valeur choisir ? La littérature existante n'est pas prolixe sur ce sujet et ne permet guère de contester sérieusement, ni d'avaliser, une opinion courante pour les biens environnementaux, qui plaiderait pour une élasticité au moins unitaire du « consentement à payer climatique », à niveau de qualité climatique donné. Le consentement à payer s'accroîtrait alors au moins de 1 % lorsque le revenu s'accroît de 1 %, mais le taux d'escompte à défalquer serait plus élevé si la qualité climatique décroissait⁽²⁸⁾.

Par ailleurs, les difficultés dues au risque et à l'horizon, évoquées séparément jusqu'ici, s'entrecroisent. Ainsi à long terme, pour tenir compte du risque, le taux d'actualisation, s'il est appliqué aux équivalents certains des coûts, devrait décroître⁽²⁹⁾. Concluons provisoirement : même si cet argumentaire sur la prise en compte des aspects intertemporels dans le calcul

(26) Voir les rapports de groupes de travail du Commissariat général du Plan parus à La Documentation française, tels Bernard (1972) ou Milleron, Guesnerie et Crémieux (1979), en particulier pp. 30-31.

(27) Comme le montre la parabole esquissée dans une note en cours de rédaction, cette procédure diminue le taux d'actualisation apparent, mesuré par rapport à une évaluation des avantages fondés sur les valeurs présentes. Ce taux devient $g(\sigma - \beta)$, avec g le taux de croissance, σ l'aversion relative au risque de la société, β l'élasticité-revenu du consentement à payer pour le bien environnemental (voir Guesnerie, 2002).

(28) Tout ceci dépend bien évidemment non seulement de l'ampleur, mais aussi de la nature de la détérioration climatique envisagée.

(29) La parabole de Guesnerie (2002), poursuivie dans la logique indiquée par Weitzman (2001) suggère que le taux d'actualisation appliqué aux équivalents-certains (une procédure qui dans le cas général est peu satisfaisante mais qui couvre le cas limite) devrait être à très long terme autour de $(\text{Min } g)(\sigma)$ pour les investissements concernant les biens privés. Le taux d'actualisation devrait être encore notablement atténué, selon une formule plus compliquée (et avec les ordres de grandeur évoqués précédemment pour g , σ et β , être voisin de zéro) pour le bien environnemental.

économique requiert beaucoup plus d'élaboration, il suggère que, *compte tenu de l'incertitude et parce que le bien environnemental considéré est un bien dont la valorisation croît avec la richesse, un calcul économique convenable n'implique pas un écrasement des valorisations futures des aménités environnementales*. Ceci est le cas même si les générations futures sont plus riches que la génération présente. Il en va ainsi dès lors que le bien-être des générations futures n'est pas escompté outre mesure par un coefficient de préférence « pure » pour le présent, dont on peut justifier la présence, mais non, du point de vue éthique une valorisation élevée.

2.6. La valeur d'option

Enfin, le changement climatique qui serait induit par l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre a des aspects irréversibles qui ont été discutés dans la première partie de ce rapport. Rappelons que la réversibilité de la concentration du CO₂ est extrêmement lente à long terme. La réversibilité est plus problématique encore pour les modifications ultérieures du climat induites par l'effet de serre qui pourraient, c'est du moins l'opinion qui prévaut chez de nombreux scientifiques, provoquer des bifurcations climatiques (dont l'archétype est le changement d'attracteur pour la circulation thermohaline) proprement irréversibles à l'échelle humaine.

Concrètement, à l'échelle de temps qui nous concerne ici, on peut seulement à la date t viser à un horizon $t + T$ (pas « trop » éloigné) une stabilisation des concentrations à un niveau pas « trop » supérieur au niveau actuel. La fonction qui mesure le coût d'atteinte d'un objectif de concentration à T à partir d'un niveau initial donné est fortement convexe, c'est-à-dire, conformément à l'intuition, présente des coûts marginaux fortement croissants (Ha-Duong et al., 1997). Chaque instant qui passe accroît le coût ou bien fait disparaître une option de stabilisation ultérieure. Cette situation justifie donc si de l'information nouvelle – éclaircissement scientifique attendu de nouvelles recherches sur la dynamique de l'effet de serre et les dégâts qu'il engendre – est susceptible d'améliorer notre connaissance de l'intérêt de ces options, d'utiliser dans le calcul économique ce que Arrow et Fisher (1974) et Henry (1974) ont appelé une valeur d'option.

Explicitons dans le cadre du problème qui nous concerne, les modifications du problème décisionnel suscitées par *l'arrivée d'informations nouvelles*, et voyons plus précisément pourquoi ces modifications justifient la prise en compte, dans le calcul économique simplifié qui ne traite pas explicitement cette question d'information, de la valeur d'option.

Pour cela, supposons d'abord que la communauté internationale décide de plafonner les concentrations de GES à 550 ppm par crainte d'une explosion du coût des dommages au-delà de ce seuil. Dans ce cas, le *report de l'action est plaidable* comme l'indiquent la plupart des modèles à long terme : il vaut mieux en effet ne pas accélérer l'obsolescence du capital existant, attendre que des énergies alternatives sans carbone viennent sur le marché à bas prix et faire ainsi payer les « réductions » à nos descendants, plus riches que nous.

Mais l'on peut imaginer que dans vingt ans, par exemple, de nouvelles informations nous signalent que la zone dangereuse commence à 450 ppm. Les coûts du freinage accentué que cette nouvelle information scientifique sur la nocivité climatique justifierait plaident pour une action plus rapide et plus résolue dès maintenant. On a ici une illustration de l'effet « irréversibilité » : une « fenêtre de tir » va se fermer et le surcoût que cette fermeture peut imposer à la génération suivante justifie une décélération certes progressive mais immédiatement significative de nos émissions de GES. Une valeur d'option convenable⁽³⁰⁾ réconciliera les résultats du calcul économique simplifié, qui ne procède pas à l'optimisation complète des stratégies, avec ceux de la procédure exhaustive de l'optimisation stochastique.

Il est utile, pour compléter cette discussion de revenir sur le fait que c'est *le stock* des GES dans l'atmosphère qui détermine l'externalité climatique : le flux annuel ne contribue qu'à des mouvements faibles.

L'effet stock suggère en effet que lorsque le pas de temps est faible l'addition au stock des émissions sur la période ne change que peu le dommage marginal, c'est-à-dire que la fonction de dommages directs est « plate ». L'argumentation est présentée et discutée avec plus de détail dans le complément du rapport rédigé par Philibert. Elle implique que, si l'espérance mathématique des dommages calculée à chaque moment ne fait apparaître aucun effet de seuil le coût d'option lui-même devrait être peu variable avec la concentration⁽³¹⁾. Donc, dans la zone qui nous concerne aujourd'hui, et en l'absence d'arguments scientifiques rendant plausible l'apparition de seuils, *en espérance* à moyen terme, la *fonction de dommages* (comme fonction de la concentration) *doit être prise approximativement linéaire*, avec *dommage marginal espéré peu variable* dans une assez large zone de concentrations (voir Newel et Pizer, 2000). *La fonction qui définit le coût d'option* (toujours en fonction de la concentration), n'en est pas pour autant nulle. Mais elle est aussi, sous les hypothèses que nous avons esquissées, approximativement linéaire et, donc définit une valeur marginale d'option relativement constante⁽³²⁾.

(30) Qui pourrait avoir une incidence de l'ordre de la moitié de celle des taux d'actualisation retenus (Ha-Duong, 1998).

(31) Puisque, si l'option ne se situe pas au voisinage de bifurcations climatiques dangereuses avérées en moyenne, la valeur des options disparaissant à l'instant t n'est pas elle-même fortement variable.

(32) L'argument de linéarité ne dit, en tant que tel, rien sur la mesure de l'intensité du dommage marginal, sur la valeur d'option qu'il doit incorporer, et donc sur le bon signal prix à fournir aux acteurs décentralisés. Cette conclusion sur la forme de la fonction de dommages a cependant d'autres conséquences qu'il faudra examiner plus tard.

2.7. Les limites respectives de la climatologie et de l'économie : une parenthèse

L'analyse qui précède a un caractère méthodologique prononcé. Elle constitue cependant un préalable parfois abstrait mais nécessaire à la discussion approfondie d'une question essentielle soulevée par nombre de controverses actuelles, celle du rythme souhaitable de l'action collective. Nous reprendrons cette discussion. Il faut souligner maintenant combien les hésitations méthodologiques et substantives, dont l'exposé prend un tour parfois très technique, ne font souvent que refléter une compréhension limitée qui porte à la fois sur les incidences de l'effet de serre sur le climat et sur leur évaluation économique. Essayons de faire la part de ces effets enchevêtrés.

Il est clair d'abord que la nature des perturbations engendrées par l'évolution climatique affecte profondément leur évaluation : par exemple, une détérioration générale du climat de la planète, soit temporaire parce que liée au rythme des changements des concentrations, soit permanente lorsque à long terme la concentration serait stabilisée, donne beaucoup de poids à l'argument de modification des prix relatifs. Cet argument détermine une réduction drastique des effets de l'actualisation simplifiée à laquelle l'économiste recourt spontanément. Sous d'autres hypothèses, celles d'un « changement climatique doux », les coûts d'un changement climatique pourraient être bornés par les coûts économiques de relocalisation des activités sur la planète. De même, toute la discussion sur les coûts d'option serait bouleversée si le savoir parvenait à identifier plus clairement des risques de « catastrophes climatiques ». Les hésitations des économistes ne font souvent ici que refléter les incertitudes du savoir climatologique.

Cependant, l'économiste, porteur d'une certaine vision rationnelle des choix sociaux qui, ici comme ailleurs est essentielle, doit faire preuve d'une certaine humilité. L'horizon lointain qu'il faut adopter exacerbe les difficultés. D'abord, celles tenant à la nature de l'incertitude. Ensuite, celles de la comparaison intertemporelle. Considérons ces points successivement.

Examinons d'abord l'accroissement des difficultés de traitement de l'incertitude. Confronté à des risques inédits, faisant face à des occurrences d'événements exceptionnels pour lesquels l'objectivation des probabilités est impossible, le modèle rationnel touche à ses limites. Plus prosaïquement, le choix de la décision collective est le plus souvent *sensible non seulement aux spécifications de la théorie* – la rationalité doit s'exprimer dans le choix d'une probabilité subjective ou d'une probabilité subjective « pessimiste » – mais aussi au choix d'une *conception de la rationalité individuelle*, qui va elle-même commander *la rationalité sociale*.

Ainsi, la théorie standard (voir encadré 4) s'appuie sur une réflexion séculaire concernant l'avenir risqué pour proposer une définition réfléchie

de la « rationalité » en avenir incertain qui étend les conclusions traditionnelles en faisant émerger le concept de *probabilités subjectives*. Mais, en élargissant l'espace des paramètres sous-jacents à la décision rationnelle des fonctions d'utilité aux couples fonctions d'utilité et probabilités subjectives, elle affaiblit les capacités prédictives et/ou prescriptives qu'avait la théorie en avenir risqué. Les théories rivales proposant d'autres définitions de la rationalité sous incertitude, et dont les résultats font émerger les concepts plus sophistiqués de « capacités », accroissent plus qu'elles ne réduisent l'espace de l'indétermination rationnelle.

4. La décision rationnelle face à l'aléa

Le choix rationnel en avenir incertain est un sujet classique, auquel Pascal apporta des contributions pionnières. Dans son célèbre pari, il introduit l'espérance mathématique des gains (la somme des gains pondérée par les probabilités) comme maximande du problème de décision. Le paradoxe de Saint Petersburg de Bernouilli suggère de substituer le critère de l'espérance mathématique de l'utilité des gains (la somme de l'utilité des gains pondérée par les probabilités) à celui de l'espérance des gains. Les progrès de la réflexion conduiront aux deux synthèses modernes, qui dérivent le critère de choix d'une axiomatique plus fondamentale.

Dans le cas où les probabilités sont objectives, c'est-à-dire reflètent des lois de probabilité scientifiquement avérées (avec toute l'ambiguïté que peut recouvrir ce terme), l'avenir est dit risqué et l'axiomatique de Von Neumann conclut à l'utilisation du critère de l'espérance de l'utilité.

Dans le cas où les événements ne sont pas régis par des lois mises scientifiquement en évidence, Savage établit qu'un acteur rationnel au sens de son axiomatique évalue, ou tout se passe comme si il évaluait, les conséquences à l'aune de l'espérance mathématique de l'utilité, étant donné que l'espérance mathématique est alors calculée à l'aide de probabilités subjectives qui ont (presque) toutes les propriétés formelles des probabilités.

L'explication par la théorie moderne des choix en avenir incertain, dans le cadre de la problématique de l'espérance de l'utilité met en exergue le rôle des dérivées de la fonction d'utilité et relie l'« aversion au risque » à la dérivée seconde, la « prudence » à la dérivée troisième, etc.

À la suite des critiques d'Allais et Ellsberg, tout un courant de réflexion remet en question le critère de l'espérance des gains : par exemple, certains suggèrent de remplacer les probabilités par des capacités, qui sont des fonctions d'ensembles plus générales.

Le second problème sur lequel la réflexion économique achoppe est celui de la comparaison de bien-être entre les générations, particulièrement quand des générations lointaines sont concernées. Ce problème a une dimension qu'il faut bien appeler « éthique » qui a été ci-dessus abordée comme telle dans une logique « utilitariste » familière aux économistes mais bien sûr discutable.

Il n'est pas surprenant qu'un problème qui met en cause la survie de l'humanité, ou tout au moins l'intégrité du « vaisseau spatial » qui abrite l'espèce humaine, ait des dimensions dont l'évaluation ne puisse être épuisée par la discussion technique des choix selon le modèle de rationalité économique. Même la considération de l'éthique, au sens strict, ne peut rendre compte d'aspects touchant à ce qu'il convient d'appeler la « métaphysique ». Tel est en tout cas le sens des prises de positions de plusieurs philosophes tel que Hans Jonas, « faisant... de la peur spirituelle envers ce qui peut menacer l'humanité le fondement d'une nouvelle éthique de responsabilité qui s'imposerait de façon catégorique aux responsables politiques » (dans Godard, 2001, voir Jonas, 1999, et Dupuy, 2001). Sans traiter le problème au fond, on peut trouver par ailleurs significatif que Daedalus, la revue de l'American Academy of Sciences, ait consacré en 2001 une partie d'un numéro spécial sur les changements climatiques à une analyse des positions des grandes religions sur les problèmes environnementaux.

Il convenait d'ouvrir cette parenthèse, non pour discréditer l'analyse économique mais pour la remettre en perspective. Ce faisant, il convient de ne pas interpréter incorrectement les commentaires critiques sur l'approche économique de l'incertitude et de l'avenir. Les réserves faites ne prétendent pas suggérer l'existence d'approches alternatives supérieures qui seraient aujourd'hui disponibles et accessibles à la raison. Elle ne recommandent pas la substitution de principes alternatifs à la réflexion économique. Par exemple, le *principe de précaution*, selon lequel « l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement », suggère d'éviter la dégradation de l'environnement tant qu'on n'est pas assuré de son innocuité. Dans les faits, au scepticisme parfois exprimé par les économistes sur ses fondements, répond ici la faible valeur opérationnelle du concept si l'on en reste à la définition ci-dessus (Gollier et *alii*, 2000). La phrase est compatible avec une conception intégriste du principe de précaution, le principe d'abstention⁽³³⁾. Ce dernier imposerait au moins que l'on stabilise sans délai la concentration des GES, voire, puisque l'innocuité des émissions post-industrielles n'est pas

(33) Il y a plusieurs conceptions possibles du principe de précaution : tel que défini par le droit interne et les textes de doctrine ; la « règle d'abstention » dont on peut identifier trois composantes : le dommage zéro comme norme générale de l'action (vouloir l'innocuité) ; le renversement de la charge de la preuve (vouloir la preuve de l'innocuité) ; la focalisation sur le scénario du pire (en situation d'incertitude scientifique, vouloir l'innocuité, c'est vouloir l'innocuité du scénario du pire). Voir Godard (1997).

prouvée, que l'on revienne à un niveau préindustriel. Ceci impliquerait une compression drastique du niveau des émissions que personne apparemment ne propose, soit parce que le changement du style de vie qu'elle implique est clairement irréaliste, soit parce que les solutions (partielles) à coût modéré – nucléaire par exemple – sont récusées au nom même de la précaution. Une version modérée du principe, qui ajoute la précision « à un coût économique acceptable »⁽³⁴⁾, plaide pour une action immédiate, mais ne permet pas d'en déterminer le rythme : une action rapide et résolue doit trouver son espace dans les limites de coût autorisées par le réalisme économique ou politique. Ce qui nous ramène à l'argumentaire économique.

3. L'évaluation économique du Protocole de Kyoto

Nous procéderons ici à une évaluation du Protocole en portant successivement un regard économique critique sur la chronologie de l'action proposée, l'ampleur de l'effort qu'elle requiert, deux questions où la problématique coûts-bénéfices longuement proposée est particulièrement utile, puis les mécanismes qu'elle met en place et, plus généralement, sur l'architecture de l'accord.

3.1. La chronologie de l'action

L'état de nos connaissances justifie-t-il une action rapide, c'est dire la mise en place d'un protocole comme celui de Kyoto, ou au contraire l'attentisme ? Comment évaluer l'ampleur de l'effort sous-jacent au Protocole de Kyoto ? Ces deux questions sont quelque peu distinctes, même si chacune doit être évaluée en particulier à l'aune du calcul économique dont nous avons introduit les ingrédients et rappelé la logique.

Considérons d'abord la première question : la mobilisation planétaire autour d'un accord environnemental de type Kyoto constitue-t-elle une réponse à une urgence ou de la précipitation ?

La conviction constamment exprimée dans ce rapport est qu'au regard de l'ensemble des données disponibles, l'action initiée par les conférences intergouvernementales successives depuis le Sommet de Rio en 1992, a été dans l'absolu non trop précoce, mais, à cause du retard de la prise de conscience du phénomène (les premières modifications anthropiques des concentrations atmosphériques de GES se sont manifestées depuis deux siècles), clairement trop tardive. Deux objections méritent cependant examen.

(34) Avec cet ajout, la citation ci-dessus constitue la définition de la précaution dans la loi dite Barnier sur l'environnement. Pour une discussion du principe de précaution et de ses applications, voir par exemple Kourilsky et Viney (2000), Commission européenne (2000), ou Godard (1997).

Une première objection à l'action, le rôle des émissions de GES dans le changement climatique n'est pas avéré, reprend un plaidoyer antérieur pour l'attentisme, alors même que l'évidence scientifique en sens inverse se précise. Comme on l'a déjà dit, cette objection est maladroite. Plus la température est un signal brouillé de la concentration des GES, et sauf si le brouillage avait un biais systématique avéré et de signe convenable, plus sans doute l'action est justifiée.

Une seconde objection, rien ne sert de partir dès maintenant puisque le salut viendra de l'innovation technologique, met en cause, d'une autre manière, la pertinence d'une action rapide et mérite plus ample discussion. Elle repose sur une remarque peu contestable : les leviers de l'action immédiate sont loin de permettre une complète résolution du problème. Que le salut, c'est-à-dire en définitive la substitution de nouveaux combustibles aux combustibles fossiles ou bien encore la séquestration à large échelle des GES, ne puisse venir que de l'innovation technologique, est entièrement exact. Même si, à vrai dire, personne ne peut prédire aujourd'hui la recette miracle : nouvelle génération nucléaire (surgénérateur, fusion « froide »), photovoltaïque ou électricité solaire à concentration, ou bien encore méthode révolutionnaire de séquestration et de stockage du carbone. Mais l'objection néglige le fait que les premières mesures qui seraient prises dans le cadre de Kyoto, même si l'on doute qu'un pourcentage important entre dans la catégorie « sans regrets », sont à *coût faible*, et par là même pour un certain nombre d'entre elles, de rentabilité supérieure aux actions alternatives, recherche y comprise.

Si l'on ajoute à cet argumentaire les vertus d'un affichage précoce et fort de priorités collectives dont la réalisation s'étale sur longue période, il y a peu de doutes que la mise en place sans délai d'une action sur l'effet de serre est aujourd'hui pleinement justifiée. Reste à apprécier son ampleur et sa forme.

3.2. L'ampleur de l'action

L'ampleur de l'effort décidé à Kyoto, doit être évaluée d'abord à partir de considérations coût-efficacité, étant entendu que « Kyoto », dans cette partie de la discussion se référera à l'accord initial entre les pays de l'Annexe B (États-Unis compris) accompagné des mécanismes de flexibilité.

En ce qui concerne les coûts, le tableau 4 indique le taux d'effort, c'est-à-dire le ratio coûts/PIB, pour une série de pays (selon des calculs qui intègrent les dispositions récentes sur les puits de carbone).

Ces estimations de coûts, certes optimistes au regard de la moyenne de celles évoquées précédemment, suggèrent que l'effort demandé en 2010, quelques dixièmes de point de PIB, est relativement modéré. Examinons cette assertion à la lumière d'un calcul économique très simplifié que nous allons peu à peu complexifier.

4. Taux d'effort pour respecter les engagements de Kyoto

En %

	Objectif de Kyoto	Avec marché et puits
États-Unis	- 7,0	0,14
Canada	- 6,0	0,05
Union européenne	- 8,4	0,05
dont France	+ 0,0	0,03
Fédération de Russie	+ 0,0	- 0,9
Japon	- 6,0	0,05
Australie + Nouvelle-Zélande	- 6,8	0,11
Ombrelle ^(*)	- 6,2	0,11
Total Annexe B	- 4,7	0,02

Note : (*) En raison des regroupements des différents pays au sein de POLES, les pays ici comptabilisés sous le vocable Ombrelle sont les États-Unis, le Canada, le Japon, l'Australie et la Nouvelle-Zélande.

Source : Maquette SAGESSE (D4E, ministère de l'Écologie et du Développement durable), bâtie à partir des données de POLES.

On peut se demander d'abord quels bénéfices en 2110, un siècle plus tard, on doit attendre pour rentabiliser un effort présent d'un dixième de point de PIB. Le rendement, avec un taux d'intérêt de 4 %, est approximativement de cinquante fois la mise initiale, c'est-à-dire 5 points de notre PIB. Si l'économie a crû au rythme annuel de 2 %, il n'est que 3/4 de point du PIB 2110. Mais les modèles climatologiques nous indiquent que l'effort Kyoto, maintenu sur un siècle, ne garantit qu'une baisse des températures par rapport au scénario au fil de l'eau, inférieure à 0,2 degré. Par ailleurs, les dommages sont parfois évalués, en 2110, pour l'ensemble du réchauffement à 2 points de PIB. Sur la base de ces données, un raisonnement grossier suggère que la rentabilité de l'effort est problématique, en d'autres termes qu'il constituerait une manière inefficace de contribuer au bien-être des générations futures. Les modèles agrégés d'optimisation des politiques climatiques qui ont été développés (DICE ou sa version régionalisée, RICE), ne font que sophistication l'actualisation très simpliste qui vient d'être suggérée. Ils s'accordent pour recommander un effort beaucoup moins ambitieux que celui assigné par les cibles de court terme de réduction des émissions définies à Kyoto, voire un effort presque symbolique. Ces modèles ont des mérites, en particulier celui de considérer explicitement la modulation temporelle de l'effort, un problème dont le traitement convenable est essentiel à la conception des politiques : il faut agir aux périodes où c'est le moins coûteux, et donc éventuellement attendre l'arrivée d'opportunités technologiques⁽³⁵⁾. Par ailleurs, il est légitime et nécessaire de comparer l'effica-

(35) Les techniques classiques du calcul économique suggèrent une première approche opératoire de cette modulation temporelle : égalisation du taux de rentabilité immédiate de l'action et du taux d'actualisation. Mais elles ne permettent pas, compte tenu des incertitudes sur la rentabilité de la recherche, de trancher de manière très convaincante sur la répartition de l'effort entre le rythme de réduction des émissions et le rythme de la recherche qui permettra une réduction des coûts ultérieurs.

cité de toutes les formes d'action sur le bien-être des générations présentes et futures dont nous disposons, et donc de s'interroger sur l'efficacité relative de la politique climatique et par exemple d'actions plus spécifiques sur l'eau potable. Le calcul économique actualisé constitue très généralement la manière la plus convaincante de procéder à de telles comparaisons.

Ni la modélisation ni l'actualisation ne sont *a priori* suspectes. Cependant, à la fois le traitement des dommages du changement climatique et les procédures d'actualisation retenues dans ces modèles suscitent de sérieuses interrogations qui conduisent à considérer avec scepticisme leurs recommandations. Les raisons de ce scepticisme peuvent être assez simplement et brièvement exprimées. Selon RICE-99 (Nordhaus et Boyer, 2000), la valeur actualisée des dommages totaux dus au changement climatique, au voisinage du scénario de référence au fil de l'eau, dommages dont l'évaluation résulte essentiellement de choix exogènes au modèle, équivaut à deux mois du PIB mondial 2000. S'il en était ainsi, le problème de l'effet de serre serait bien sûr un problème économique mineur : compte tenu de ce que l'on sait sur les coûts de réduction des émissions, il n'est pas besoin d'être grand clerc en optimisation pour conclure que l'inaction conduit à des résultats voisins de l'action optimale⁽³⁶⁾. Qui plus est, la mise en œuvre d'une politique visant à limiter l'accroissement de température à 1,5 degré à l'horizon 2100, un objectif que l'on peut spontanément trouver moyennement ambitieux, conduirait selon les mêmes modèles, à multiplier par quatre les coûts de l'effet de serre en l'absence de toute action ! Il y a évidemment *une totale incompatibilité entre ces résultats et l'intuition qui a déterminé depuis plus de dix ans l'action internationale*.

Cette incompatibilité peut signifier que l'intuition écologique est grossièrement erronée, mais le fût-elle, il paraît invraisemblable qu'elle le soit autant que ce que suggèrent les chiffres avancés. Mentionnons pour mémoire une objection technique qui est loin d'être négligeable : les simplifications adoptées dans la modélisation du cycle du carbone auraient conduit à une sous-estimation systématique et semble-t-il importante du forçage climatique⁽³⁷⁾. D'autres raisons, pas moins importantes, plaident pour une réhabilitation de l'intuition fondatrice. Allons des plus fondamentales aux plus terre à terre.

En premier lieu, on l'a déjà dit, certaines dimensions de cette intuition écologique – le maintien de l'intégrité du vaisseau spatial terre et le « catastrophisme éclairé » qu'il justifierait sont difficiles à intégrer dans le raisonnement analytique, sans que l'on puisse les récuser au nom de la raison.

(36) Toujours à partir des modèles DICE et RICE, Lomborg (2001) indique que la mise en œuvre de la politique optimale apporte un gain social équivalent à deux jours (!) de la production mondiale aujourd'hui.

(37) Par exemple, dans le cadre d'un scénario de stabilisation à 1 000 ppm, le modèle permet un volume d'émissions deux fois plus élevé en 2100 que celui autorisé par un modèle climatique complet.

En deuxième lieu, la partie de l'intuition écologique qui n'est pas rebelle au raisonnement analytique (considérations éthiques, irréversibilité, rôle des prix relatifs dans l'évaluation du bien-être futur, risques faibles d'évolutions climatiques extrêmes) est très largement ignorée. De fait, les modèles évoqués n'ont réussi à être simples qu'en étant trop simplistes. En ignorant, *de facto*, la dimension essentielle du phénomène effet de serre, l'incertitude, et en traitant de façon sommaire le problème de la valorisation des aménités environnementales futures, le calcul écarte le raisonnement économique qui a été présenté dans la première partie de ce rapport et dans le complément de Hourcade et Lecoq. La liste des insatisfactions et/ou lacunes est substantielle : omission de l'aversion au risque de dommages, omission d'une valeur d'option pour intégrer l'irréversibilité, traitement méthodologiquement très contestable de la valorisation d'équivalents-certains dans le long terme et traitement économiquement suspect du glissement du prix relatif des bien environnementaux. Qui plus est, ces insuffisances se conjuguent pour minorer la valorisation actualisée des dommages. En l'absence regrettable d'une alternative crédible, on ne peut lever toutes les interrogations sur les ordres de grandeur des corrections à apporter. Cependant, on ne peut aujourd'hui considérer les résultats de ces calculs qu'avec suspicion, et s'inquiéter du cas qui en a été fait.

Troisième point, au-delà d'une critique portant sur la méthodologie proprement dite du calcul, il faut noter qu'une action initiale relativement vigoureuse a des mérites qui sont ignorés, lorsque le raisonnement qui sous-tend lesdits calculs repose sur l'hypothèse (comme c'est le cas dans les modèles qui viennent d'être discutés) d'un progrès technique exogène et « tombé du ciel ». Une tonne de carbone, aujourd'hui, à un prix significativement supérieur aux 10 euros suggérés dans RICE, renforcerait, à la fois de par sa valeur présente et par la crédibilité qu'il apporte à l'engagement, les incitations à l'innovation technologique. En d'autres termes, *l'affichage précoce d'une volonté politique* et sa concrétisation dans des signaux prix significatifs pour le carbone ou les autres GES constituent des facteurs de stimulation, des aiguillons significatifs d'une politique de recherche et développement (R&D). *Kyoto*, au sens d'une première phase d'action vigoureuse fournissant un signal fort et crédible de la qualité de l'engagement collectif, *et la stimulation du progrès technique sont des compléments et non des substituts*.

Reste, et c'est le quatrième point, que les mêmes analyses sous-estiment ce que l'on appelle parfois les bénéfiques « ancillaires » de la décarbonisation de l'économie à laquelle la réduction des émissions des GES conduirait. La diminution de la pollution urbaine constitue l'archétype de l'effet induit de la politique climatique, effet qui serait important particulièrement dans les premières phases. On ne peut passer complètement sous silence non plus, les conséquences positives en matière de sécurité d'approvisionnement et d'indépendance énergétique.

Concluons : l'appréciation de l'ampleur de l'effort assigné par le Protocole de Kyoto n'est pas pleinement conclusive du point de vue de l'analyse coûts-bénéfices. Le verdict dépend de l'assignation de la charge de la preuve. Pourtant entre une conception assez stricte de la précaution, qu'on peut juger respectable étant donnée l'ignorance sur les risques encourus et les conclusions d'une optimisation économique trop caricaturale, Kyoto choisissait une voie moyenne. On ne peut nier que cette voie moyenne est discutable, mais les bons arguments pour penser que Kyoto fait trop ou trop peu ne font pas preuve si la charge en revient à ceux qui contestent l'intensité de l'action.

Le sentiment exprimé dans ce rapport est que les coûts de Kyoto sont faibles au regard de l'ampleur potentielle du problème climatique. Que les pays riches retardent aujourd'hui leur développement de quelques mois (selon les estimations que nous avons discutées, mais ce pourrait être dans la même logique de quelques années d'ici la fin du siècle prochain) pour se mettre en état de faire face à une menace collective dont la réalité, sinon l'ampleur et l'échéancier, est avérée, est bien le moins qu'ils (que l'on) puissent (puisse) faire.

Naturellement, prendre acte, s'apprêter à faire face et prendre les premières dispositions, ce que fait Kyoto, ne prédétermine pas de l'action future qui devra bénéficier des progrès de la compréhension du changement climatique et des dommages qu'il induit. Il sera nécessaire, selon toute vraisemblance, d'accentuer l'effort. Ou bien, ce qui paraît aujourd'hui assez peu plausible, si la connaissance améliorée confortait les thèses « négationnistes », faire porter l'effort sur l'adaptation plutôt que la prévention.

3.3. Évaluation critique des mécanismes de flexibilité

Kyoto est le fruit d'une négociation internationale dont les acteurs et les décideurs sont les États. Il s'agit d'une donnée lourde de l'ordre international qui s'impose à toute tentative de construction d'un accord global. Le choix d'une politique de quantités, attribuant à chaque pays des quotas d'émissions, résulte plus des contingences de la négociation que de la nécessité institutionnelle : une politique de prix (taxation) a d'abord été proposée par les Européens, avant Rio, puis rejetée par l'Administration américaine qui préférerait une réglementation sous forme de quotas. L'option « politique de quantités » adoptée à Kyoto, la différenciation des objectifs entre les États qu'elle implique, reflète les réalités d'une négociation dans laquelle les avantages perçus de la politique et ses coûts individuels sont dispersés.

Avec ces données, États souverains d'un côté, politique de quantités de l'autre, « l'équation » de Kyoto est simple : *comment maximiser l'effica-*

cité environnementale sous contrainte d'acceptabilité politique ?⁽³⁸⁾
C'est au regard de cette équation que sera évaluée l'économie de Kyoto, avec en particulier de ce que l'on appelle ses *mécanismes de flexibilité*. Rappelons qu'ils sont constitués par :

- le marché des autorisations d'émission entre pays de l'Annexe B (dont la liste diffère légèrement de celle des pays de l'Annexe I de la Convention des Nations unies sur le changement climatique (CNUCC), qui doit s'ouvrir en 2008, c'est-à-dire les permis d'émission négociables. Les caractéristiques d'un système de permis d'émission négociables sont décrites dans le complément à ce rapport de Cros et Gastaldo ;
- le mécanisme de développement propre (MDP) qui permet, à partir de 2000, à un pays de l'Annexe B mettant en œuvre un projet de réduction des émissions dans un pays hors Annexe B, d'obtenir des unités de réduction d'émission certifiées ;
- le mécanisme de mise en œuvre conjointe (MOC), débutant en 2008, qui permet à un pays de l'Annexe B mettant en œuvre un projet de réduction des émissions dans un autre pays de l'Annexe B, de se voir transférer une part des crédits d'émission de ce dernier pays.

La fin des tergiversations européennes à La Haye concernant le *marché international de permis d'émission négociables* a entériné une novation institutionnelle majeure *a priori* favorable à la coopération internationale.

En premier lieu, en donnant à certains pays de « l'air chaud » (terme utilisé pour désigner des quotas attribués au-delà des émissions actuelles), et par conséquent non contraignants, les transactions sur le marché permettent une forme limitée de transferts internationaux. Ceux-ci élargissent l'espace de négociation et accroissent *a priori* la probabilité de succès de l'Accord.

En second lieu, *le marché abaisse les coûts individuels et globaux d'observance*. D'abord, parce qu'il fournit une sorte de recours et d'assurance pour les États signataires en cas de difficultés internes spécifiques (hivers rigoureux, grèves des transports, opposition résolue au freinage des émissions dans un secteur, etc.)⁽³⁹⁾. Ensuite, parce qu'il transfère l'effort là où il est moins coûteux, abaissant le coût total des politiques d'émission dans des proportions qui peuvent être appréciées par l'abaissement de la taxe carbone marginale associée. Le tableau 5 reprend et complète des estimations du taux d'effort (coût rapporté au PIB) du tableau 4 et illustre l'abaissement des coûts que permet le marché de permis. Gherzi et Hourcade (2002) et Philibert (2002) donnent des informations complémentaires sur l'évolution des coûts en fonction de l'évolution des accords internationaux.

(38) Il convient de noter dès maintenant, pour éviter de caricaturer les positions des uns et des autres, que l'efficacité environnementale n'est pas nécessairement unidimensionnelle : toutes choses égales par ailleurs, on peut préférer un objectif environnemental plus modeste sur la période Kyoto contre un prix carbone plus élevé ou une dispersion des prix carbone plus incitative pour la recherche. Par ailleurs, certaines dimensions de l'acceptabilité politique, par exemple risques de délocalisation, peuvent être évaluées de façon subjective.

(39) Il y a sans doute quelque naïveté, optimisme, voire mauvaise foi pariant sur l'absence réelle de sanctions à accepter des quotas à échéance de dix ans sans assurance contre de mauvaises surprises vis-à-vis des coûts.

5. Impact d'un marché des permis d'émission sur le taux d'effort (coût par rapport au PIB) pour respecter les engagements de Kyoto

	En %		
	Kyoto	Sans marché	Avec marché
États-Unis	- 7,0	0,33	0,20
Canada	- 6,0	0,27	0,15
Union européenne	- 8,4	0,17	0,07
dont France	+ 0,0	0,09	0,05
Fédération de Russie	+ 0,0	0,00	- 1,31
Japon	- 6,0	0,17	0,08
Australie + Nouvelle-Zélande	- 6,8	0,26	0,19
Ombrelle ^(*)	- 6,2	0,29	0,17
Total annexe B	- 4,7	0,22	0,04
Prix du permis en \$90/tC	50,9		

Note : (*) En raison des regroupements des différents pays au sein du modèle POLES, les pays ici comptabilisés sous le vocable *Ombrelle* sont les États-Unis, le Canada, le Japon, l'Australie et la Nouvelle-Zélande.

Source : SAGESSE-POLES.

La contestation moralisante de l'instrument (la « marchandisation » de la nature) a sans doute été accentuée par la maladresse sémantique qui définissait ce marché comme celui de « droits à polluer »⁽⁴⁰⁾. On peut être sensible à la réticence qu'elle exprime à l'égard des solutions « tout marché », que l'air du temps, le fil de l'eau intellectuel plus que la nécessité font parfois prévaloir. Mais en l'occurrence, elle peut refléter une certaine incompréhension des conditions de fonctionnement d'une économie de marché complexe⁽⁴¹⁾, incompréhension qui suscite sans doute une erreur de raisonnement qu'il faut tenter de dissiper. *Diminuer le coût d'une politique environnementale contribue, non pas à faire un cadeau aux pollueurs, mais toutes conditions du marchandage égales par ailleurs, à accroître le niveau d'effort qui peut éventuellement être imposé.* En abaissant le coût des politiques, en ouvrant l'espace de l'accord grâce aux transferts qu'il permet, un marché international de permis d'émission négociables constitue, dès lors que les conditions nécessaires à son bon fonctionnement sont réunies, un facteur de succès et d'efficacité des politiques environnementales liées au changement climatique⁽⁴²⁾.

(40) Les rapports au Conseil d'analyse économique sur la fiscalité de l'environnement, rédigés par Dominique Bureau, Olivier Godard, Claude Henry, Jean-Charles Hourcade et Alain Lipietz reviennent sur cette question. Voir aussi Godard, (1999) qui explique par ailleurs que l'utilisation du carbone a depuis longtemps un prix et le marché des permis ne fera que le changer.

(41) Pour lesquelles la modulation du signal-prix constitue l'instrument privilégié d'intervention, quand la régulation par les quantités en est une forme plus exceptionnelle, en particulier parce qu'elle est de mise en œuvre plus délicate.

(42) Naturellement, facteur de succès ne signifie pas garantie de succès, et on peut noter avec une ironie amère que l'innovation, initialement proposée par les Américains, n'a pas empêché leur retrait ultérieur.

À objectif de réduction totale des émissions donné, le marché d'émissions accroît l'acceptabilité politique générale. Dit autrement, à acceptabilité politique donnée, il permet d'accroître le niveau de réduction. Tel est l'essentiel de l'argumentaire favorable. Mais il doit être affiné pour tenir compte du fait que l'efficacité environnementale d'un dispositif ne se mesure pas uniquement à la réduction des émissions sur une période mais doit incorporer les effets à terme et, par exemple, les effets incitatifs pour la R&D des prix qui émergeront à un moment donné. Une objection aux marchés de permis est que le marché des permis d'émission réduit le coût marginal de l'effort et donc l'incitation à la recherche. Pour tenir compte de ce qui vient d'être dit, il faut reformuler l'objection de la façon suivante : à pouvoir de négociation politique donné, la mise en place du marché des droits, par rapport à un système pur de quotas, accroît l'effort acceptable de réduction des émissions mais réduit aussi, pour un pays acheteur, le coût marginal de l'effort et donc, sans doute, l'incitation à la recherche. Il faudrait, pour que l'argument soit correct, le compléter : le marché accroît le coût marginal pour un pays vendeur, de telle sorte que, même en tenant compte de l'identité de chacun des pays concernés, l'effet global, à supposer que le signe puisse être appréhendé, serait faible.

Les mécanismes de développement propre ou MDP, eux aussi mis en place à Kyoto, permettent, en l'absence d'engagements quantifiés des pays en développement, de leur transférer en quelque sorte gratuitement des technologies « propres », afin, peut être, de les convaincre des vertus des politiques climatiques comme leviers possibles de développement. Ces mécanismes reposent apparemment sur un principe voisin de celui qui sous-tend le marché des droits. En permettant à une entreprise d'acquitter sa facture de réduction d'émission par une action dans un pays en développement, ils réduisent le coût total d'observance, sans théoriquement affecter la performance environnementale. On ne peut cependant créditer le mécanisme des mêmes vertus que le marché de permis.

D'abord, la détermination d'une situation de référence, le fil de l'eau, devra être faite non au niveau d'un pays, mais, ce qui est évidemment beaucoup plus laborieux, au niveau de chaque projet.

Ensuite, le raisonnement précédent, à l'appui des marchés de permis, ne peut être transposé ici : un projet MDP n'est pas mis en œuvre dans un espace homogène où prévaudrait la même « taxe carbone ». Cette remarque n'a pas de conséquences particulières lorsque le projet envisagé est la plantation d'une forêt. Il en va tout différemment pour un projet industriel dans un secteur ouvert au commerce international. En l'absence de participation du pays d'accueil au marché des permis, le dispositif MDP appliqué à un tel projet crée des incitations à la délocalisation. Qualitativement, on peut même parler d'une double incitation. La première liée à l'avantage d'opérer après investissement hors de l'espace Kyoto de la taxe carbone, la seconde, dé-

coulant du rapatriement du gain carbone MDP dans le pays d'origine⁽⁴³⁾. Quantitativement, dans l'état actuel du dispositif, et compte tenu des pronostics que l'on peut faire sur le prix des permis dans l'espace Kyoto, ces incitations devraient rester modestes. Mais elles ne sont pas justifiées d'un point de vue économique, et l'application débridée de la procédure conduirait à une forme d'aide au développement sans doute économiquement et politiquement coûteuse.

Toutes ces raisons rendent inévitable un encadrement administratif lourd (le mécanisme est parfois qualifié d'« usine à gaz » par ses détracteurs) et justifient, à tout le moins, une approche très circonspecte à la mise en œuvre des MDP.

In fine, les MDP constituent un substitut bien peu satisfaisant à une participation effective des pays en développement aux contrôles des émissions. Quitte à leur demander des efforts purement symboliques, voire nuls selon des procédures d'objectifs non contraignants décrites par Philibert (2000) ou Pershing et Philibert (2001), le Protocole de Kyoto aurait aussi gagné à associer les pays du Sud. Les émissions totales de GES sur la planète n'auraient sans doute pas été considérablement modifiées par rapport aux perspectives du premier Kyoto, mais le coût global aurait été notablement abaissé alors que même certains pays du Sud auraient finalement été bénéficiaires de transferts venus du Nord. *Ce scénario*, s'il avait pu être concrétisé, aurait été d'autant plus « sans regret », qu'il aurait, bénéfice majeur, intégré les pays du Sud à l'architecture, et qu'il les aurait instruits de la mécanique de sa mise en œuvre. Comme on le verra, les choses, sur ce registre, ne sont pas nécessairement fermées, mais le retrait américain en modifie significativement la donne.

Il nous faut maintenant procéder à une première évaluation plus générale de l'architecture de Kyoto.

3.4. L'architecture de Kyoto, en courte période : un « second best » perfectible

Un certain nombre de faiblesses de l'accord de Kyoto seront détaillées ultérieurement. Nous nous contenterons de les annoncer sans dès maintenant les traiter au fond. La première, que l'effort demandé aux États-Unis était politiquement difficile à concrétiser, ne met pas en cause l'architecture elle-même, sauf à faire l'hypothèse qu'un accord portant sur les quantités en mettant l'accent sur la position très excentrée des États-Unis sur le diagramme du spectre d'émissions par tête, réduit son pouvoir de négociation.

(43) Imaginons un investissement faisant passer les émissions de carbone de C à c sur un équipement donné. Pour un groupe industriel ayant un parc diversifié, l'équation du coût carbone après investissement est la suivante : pc , s'il reste dans l'Annexe B, 0 s'il se délocalise sans MDP, $p(c - C)$ s'il se délocalise avec MDP. Noter que p , le prix du permis peut cependant baisser si le mécanisme est effectif (voir Godard, 2002).

Seconde faiblesse, la rigidité des objectifs est parfois dénoncée sur la base d'un argumentaire technique qui met l'accent sur le contexte d'externalités de stock et sur le fait que la pente de la courbe de dommage marginal est beaucoup plus faible que celle de coût marginal. On le verra, l'argument est jusqu'à un certain point recevable. Face à une incertitude sur les coûts de réduction des émissions, il conduit à recommander d'amender Kyoto, pour y introduire un mécanisme de soupape de sécurité prix. Quelles que soient les difficultés de mise en place de ce mécanisme – il faut se mettre d'accord sur les modalités de fonctionnement d'une agence de fourniture de permis, sur le prix auquel elle les fournirait et sur le mécanisme de recyclage des recettes – il conduirait à retoucher significativement l'architecture de Kyoto et non à la détruire.

Comment apprécier, compte tenu éventuellement des amendements qu'elle autorise, l'architecture mise en place à Kyoto ?

La conception d'un accord environnemental doit d'abord tenir compte des institutions concernées et des nécessités opérationnelles de l'observance. La logique institutionnelle fait des États souverains les partenaires de la négociation et les responsables de la mise en œuvre des mesures acceptées. Les nécessités de l'observance plaident pour les solutions les plus opérationnelles et la vérification des quotas nationaux en est une, même si, en l'état actuel des techniques, les choses sont inégalement faciles selon les gaz. L'affirmation à Kyoto de la responsabilité nationale de la mise en œuvre des accords et le choix correspondant de sanctions fondées sur les performances nationales constituent une réponse cohérente aux deux préoccupations évoquées.

Mais un accord doit aussi satisfaire aux exigences de l'efficacité économique et de l'acceptabilité politique, deux conditions distinctes même si elles sont liées :

- la réflexion économique traditionnelle sur la « décentralisation » efficace et, en l'occurrence, sur la décentralisation de la production d'un bien collectif suggère que les objectifs nationaux devraient être contingents à la réalisation progressive des aléas sur les coûts et les bénéfices. Ces objectifs devraient déterminer de façon duale, si des droits de propriété adéquats sont définis, des prix contingents des GES, éventuellement interprétables comme prix d'équilibre sur un marché de droits d'utilisation des GES ;

- l'acceptabilité politique devrait être favorisée par un élargissement de l'espace de la négociation afin d'accroître l'ensemble des accords mutuellement avantageux. Compléter le dispositif, comme le suggère la réflexion économique, par la mise en place de transferts internationaux compensatoires reflétant de façon « forfaitaire » (au sens de la théorie) les différences de « consentements à payer » (dommages) et de coûts de réduction, élargit les possibilités d'accord.

Notons, à nouveau, que le dispositif esquissé pourrait tout aussi bien se réinterpréter comme un système imposant un prix mondial des GES, dont

l'assiette serait l'émission nationale⁽⁴⁴⁾. Il serait accompagné de transferts compensatoires qui pourraient cette fois être, en partie ou totalement, concrétisés par des quotas nationaux déterminant des niveaux d'exemption.

On peut voir dans l'architecture de Kyoto, surtout si elle est complétée par un dispositif de prix plafond et prix plancher qui bornerait les transferts de manière non aléatoire, une *réponse approximativement satisfaisante* (dans le sens où elle atténue le risque d'inadéquation de l'objectif quantitatif sans le supprimer) aux *deux premières exigences*. Elle est plus insatisfaisante en ce qui concerne la troisième. Les transferts compensatoires autorisés, qui passent par l'attribution de quotas nationaux différents des performances attendues, sont très largement contraints par la forme des fonctions de coûts nationales et par l'exclusion en principe de quotas nationaux excédant le niveau de référence du fil de l'eau.

On peut comparer de ce point de vue l'architecture de Kyoto à une architecture concurrente parfois proposée qui reposerait sur la mise en œuvre à l'échelon national d'une taxe carbone dans le secteur de l'énergie, harmonisée à l'échelle internationale (Cooper, 2001). Faisant abstraction de la modulation très différente des charges, en termes de coût total ou de quotas implicites, que cette mesure impliquerait, on peut souligner qu'elle cumule des difficultés considérables :

- de définition de cette taxe : quel est le niveau de référence à partir duquel on applique la taxe carbone additionnelle, est-il le même en France et aux États-Unis ?
- de vérification de l'application intégrale de la taxe harmonisée, et ce d'autant plus que la vérification locale est difficile et que la capacité de l'administration fiscale est faible ;
- de négociation, car l'espace du marchandage est unidimensionnel, et pour autant que l'on puisse invoquer les schémas traditionnels, peu propice à l'obtention d'un accord.

Cette alternative à l'architecture de Kyoto ne paraît donc pas particulièrement séduisante, ni du point de vue de l'efficacité, ni du point de vue de l'acceptabilité.

Kyoto n'est pourtant pas la seule réponse. Par exemple, la proposition d'une agence internationale financée *ex ante* par des contributions volontaires des États, et rachetant aux acteurs les réductions d'émissions au-dessous d'un niveau de référence au fil de l'eau, est dans un certain sens comparable à Kyoto à l'aune des trois exigences que l'on vient de souligner (Bradford, 2002). Les formes de concrétisation opérationnelle de cette proposition (elle conduit à traquer les émissions de carbone fossile à la source

(44) Soulignons : un prix, non une taxe. Les relations entre ce prix mondial et une taxe mondiale ne sont pas nécessairement simples (que l'on pense au pétrole si un modèle de Hotelling décrit bien les forces de rappel de son prix à moyen-long terme).

et aux frontières), diffèrent beaucoup de celles envisagées dans le cadre du Protocole, mais elle peut être vue, au moins à court terme, comme « Kyoto-compatible » (pour une variété de points de vue, voir Jacoby, 2002 et Nordhaus, 2000).

Cette conclusion doit rester provisoire, tant il est vrai que notre analyse fait abstraction de la dynamique des accords, dynamique qu'il faut introduire pour porter un jugement plus complet. Nous y reviendrons dans la dernière partie du rapport.

4. Concrétiser Kyoto

4.1. Kyoto sans les États-Unis ?

Le Protocole de Kyoto initial dessinait un accord ambitieux, dans lesquels les pays dits de l'Annexe B, prenaient des engagements de limitation quantitative de leurs émissions. La non-participation des autres pays à l'effort collectif, essentiellement les pays en développement, était déjà un élément de fragilité du dispositif : les émissions des pays en développement pourraient dépasser celles des pays développés initialement parties à l'accord entre 2020 et 2030, selon le succès des politiques de réduction mises en œuvre. Cette fragilité a été considérablement accentuée par la décision de l'Administration Bush de ne pas ratifier l'accord, de telle sorte que les émissions des parties prenantes ne couvrent aujourd'hui qu'un peu plus de la moitié des émissions sur la planète. À court terme, le retrait américain a en particulier pour effet de déséquilibrer dangereusement le marché des permis négociables, en rendant l'offre excédentaire, de telle sorte que l'effectivité du protocole semble aujourd'hui suspendue à la décision de la Russie d'adopter un comportement monopolistique de restriction de son offre ! (voir sur ce point le complément à ce rapport de Criqui, Vielle et Viguier)⁽⁴⁵⁾.

Ce rapport a examiné les objections à Kyoto portant sur la chronologie de l'action l'ampleur de l'effort, la mécanique de mise en œuvre, et sur l'architecture elle-même. Ces objections ont pour l'essentiel été rejetées, même si les critiques formulées suggèrent des améliorations qui seront présentées plus loin. Faut-il cependant persévérer en l'absence des États-Unis ? Les remarques qui suivent, sans en fournir une démonstration complète, accréditent cependant l'hypothèse que la réponse est positive.

(45) Le rôle des puits de carbone est également important. Les plafonds élevés pour la gestion forestière adoptés dans l'Appendice Z pour le Canada et le Japon, correspondent de fait à un desserrement important de leur contrainte de Kyoto. Le plafond du Japon représente environ 4 % de ses émissions de 1990, 7,3 % pour le Canada. À titre de comparaison, la France se voit attribuer un plafond correspondant à 0,6 % de ses émissions de 1990.

En effet, malgré l'absence américaine, la ratification du Protocole de Kyoto verrait un grand nombre de pays, sinon l'ensemble du monde, coordonner leurs politiques et mettre en place des instruments collectifs novateurs en matière d'observance et de gestion. Kyoto expérimente un dispositif qu'il faudra sans doute développer. Et il obtient des résultats de réduction qui ne sont pas négligeables. Même si le produit n'est pas parfait, « la communauté internationale », comme le disent Aldy, Orszag et Stiglitz (2002) « a investi des ressources substantielles... étant donné la complexité de l'obtention d'un compromis... dans la construction d'un consensus autour de l'approche Kyoto », compromis qui ne peut être simplement passé par pertes et profits.

Même si le succès de l'opération incomplète et largement insatisfaisante que constitue Kyoto sans les États-Unis reste quelque peu aléatoire, agir pour la poursuite du processus est, selon toute vraisemblance, « mener le bon combat ». Sauf à y renoncer, les pays de l'Annexe B ont la responsabilité de faire vivre le Protocole, et ceci d'une manière exemplaire, c'est-à-dire en montrant l'efficacité de la coordination et en suscitant l'adhésion. Il n'est pas nécessaire d'être grand politique pour souligner l'importance en la matière de la volonté européenne. Qui plus est, la capacité de l'Union européenne à jouer le rôle de *leader* que lui confère le retrait américain risque d'affecter notablement sa crédibilité future sur la scène politique internationale. Le projet de directive en préparation qui sera évoqué plus loin reflète la conscience de cet enjeu. Crédibilité, efficacité et compétitivité sont les trois pierres d'achoppement de l'action européenne qu'il nous faut évoquer tour à tour.

Sur la *crédibilité*, contentons nous de quelques remarques. Notons d'abord que les actions spécifiques de certains États américains, les initiatives d'origine privée, suscitant sur la base du volontariat des échanges de carbone sur des marchés locaux, démontrent la réalité de la perception du risque climatique par le public. Au-delà de la bonne volonté citoyenne des entreprises, les actions évoquées reflètent des anticipations circonspectes et un souci de prendre les devants de taxes carbone dont la mise en place n'est pas exclue. Tous ces faits manifestent la crédibilité des politiques climatiques, crédibilité dont le maintien constituerait un facteur ultérieur de pression sur le gouvernement des États-Unis.

L'Europe doit par ailleurs prendre en compte le fait que le *leadership* qu'elle doit viser doit être soutenu par une capacité d'initiative intellectuelle plus grande qu'elle n'est aujourd'hui. On peut le regretter, mais en dépit de contributions importantes d'économistes européens, et, par exemple, la bonne qualité de la réflexion économique de l'administration dans ce pays, le débat public sur le sujet a souvent été dominé par les grands départements des universités américaines et les *think-tank* environnementaux d'outre-Atlantique, comme Resources For the Future. L'Europe est ici, comme en d'autres domaines, confrontée à la nécessité de mettre en place un dispositif d'encouragement qui fasse émerger une recherche et des études comparables, par leur volume et leur qualité, à celles existant aux États-Unis.

À l'intérieur de l'Europe, comme à l'extérieur, la viabilité politique de Kyoto repose aussi sur *la vitalité des sentiments « écologistes »*. Si les mouvements écologistes semblent aujourd'hui hésiter sur la hiérarchisation des priorités qu'impose la multiplication des fronts de la défense de l'environnement, leur mobilisation constitue une condition nécessaire au succès des politiques climatiques. La nécessité de remettre à *plat le dossier nucléaire*, pour tenir compte des aspects de sécurité (dissémination de produits fissibles) de l'effet de serre, constitue à cet égard une difficulté qu'il ne faut pas dissimuler.

Les deux autres volets de notre triptyque, efficacité et compétitivité participent aussi de la crédibilité que nous venons d'évoquer.

L'*efficacité* d'abord. Il faut, d'une part, atténuer autant que faire se peut, les coûts économiques. L'ampleur des coûts que la politique environnementale va susciter va déterminer le degré de son acceptabilité politique. Le « double dividende », excellent argument de vente, n'est guère crédible, même si on s'en tient à la formulation prudente évoquée dans la première partie, dès lors que l'on va au-delà d'actions très limitées. À l'inverse, on l'a déjà dit, certaines estimations alarmistes des coûts, fondées sur une utilisation *a priori* inappropriée de modèles macroéconomiques de court terme sont propagées par des opposants résolus à Kyoto. La vérité est intermédiaire : la mise en œuvre de la première phase de Kyoto aura un coût, plus faible qu'il n'avait été initialement envisagé, particulièrement sous l'hypothèse maintenant plausible d'un prix de permis bas. Mais la viabilité politique requiert de le contenir autant que possible. L'exposé des principes et des difficultés de leur *mise en œuvre dans une bonne politique de lutte contre l'effet de serre*, principes et difficultés présentés plus loin, souligne cet enjeu.

La *compétitivité* sera une dimension particulièrement importante de l'efficacité et qui mérite un commentaire approfondi à ce stade. L'introduction de mécanismes de flexibilité dans le Protocole de Kyoto créait ce que l'on pourrait appeler un « espace de tarification carbone » limité aux pays de l'Annexe B. Les MDP, quel que soit le jugement que l'on porte sur leur opportunité politique et leur efficacité, ne constituent aucunement une manière de compléter « l'espace de tarification carbone ». Cet espace s'est réduit considérablement avec le retrait américain. Le risque d'une distorsion de la concurrence internationale au détriment des pays signataires de Kyoto existe, et il faut en mesurer exactement la réalité. *Perte de compétitivité de certains secteurs et délocalisations* accentueraient ce coût aux yeux de l'opinion publique, éventuellement de façon spectaculaire, et pourraient en compromettre la viabilité politique.

Crédibilité, efficacité, compétitivité, tels sont les grands axes autour desquels doit s'organiser la réflexion sur la concrétisation de Kyoto, en France et en Europe. Il faut ajouter que l'action européenne n'a de sens que si elle se situe dans la perspective de relance ultérieure de l'action internationale.

L'examen de cette relance, mais aussi des améliorations à apporter à Kyoto et ses prolongements, est l'objet de l'analyse de la dernière partie du rapport.

Auparavant, il faut évoquer la question suivante : comment en France, au niveau de l'Union européenne, ou ailleurs, mettre en place une politique économique qui permette de satisfaire au moindre coût les objectifs de réduction des émissions assignés par le traité ? Vaste question, dont le traitement complet dépasse largement le mandat de ce rapport mais dont on peut cependant esquisser une première analyse.

4.2. Les options de la politique climatique : un tour d'horizon

L'analyse économique souligne la forte coordination nécessaire à l'efficacité (de premier rang) de la politique environnementale : chaque agent source de pollution doit faire face, pour que son calcul économique décentralisé internalise convenablement l'objectif environnemental, au coût marginal social de sa pollution marginale. Ce coût marginal doit être répercuté de proche en proche dans l'ensemble du système de prix, de telle sorte qu'il induise les agents à utiliser de manière économe des biens dont la production crée directement ou indirectement de la pollution. Naturellement, cet idéal définit un principe pollueur-payeur marginal, que peut concrétiser toute une gamme d'instruments, aussi bien une taxe, un quota, une taxe avec exemption, une subvention, ou encore un marché de permis d'émissions négociables dont la conception requiert éventuellement l'attribution (gratuite ou non) de quotas d'autorisations initiales. Ainsi la prescription forte d'unicité du signal-prix carbone va de pair avec une certaine indétermination de la forme précise de la politique optimale, puisque toutes les solutions peuvent affecter également le coût marginal des entreprises⁽⁴⁶⁾.

Naturellement, taxes, marchés de permis, subventions ont été et sont utilisés par les pouvoirs publics des différents pays (voir le complément de Cros et Gastaldo). La taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) est une des voies empruntées par la France malgré ses déboires dans le domaine de l'énergie (voir l'encadré 5).

Les grands principes ainsi rappelés sont loin de fournir un carcan à l'action de politique économique. À vrai dire, toutes les formes d'intervention qu'ils suggèrent laissent ouvertes l'intensité de la ponction financière qui leur est associée : ainsi, une éventuelle nouvelle taxe qui pèse sur les émissions de CO₂ peut faire l'objet d'un niveau d'exemption qui ne la fait jouer

(46) Cette indétermination reflète l'hypothèse que le coût marginal est un résumé exhaustif des coûts à prendre en compte pour la tarification. Pour une discussion serrée du mérite des différents instruments selon les contextes spatiaux et temporels, voir Helioui (1999).

5. Taxe générale sur les activités polluantes (TGAP)

La TGAP a été mise en place en 1999 à partir de taxes existantes dans le secteur de l'air et des déchets, et étendue en 2000 à trois nouveaux secteurs dans le domaine de l'eau (phosphates, phytosanitaires, granulats). Sa mise en place traduisait l'engagement du gouvernement en faveur d'instruments décentralisés et efficaces de responsabilisation des comportements des agents économiques à la rareté des ressources environnementales. Ceux-ci étaient jugés particulièrement appropriés dans les cas des dommages créés par des pollutions diffuses. Face à de nouvelles questions de même nature telles que l'effet de serre ou l'ozone, il apparaissait donc souhaitable de poursuivre le développement de l'instrument fiscal aux sources d'émission de GES.

Cette extension de la TGAP, dont le principe avait été annoncé en mai 1999 était conforme notamment aux orientations fixées par le Programme national de lutte contre le changement climatique, qui constatait la nécessité de recourir à l'ensemble de la panoplie des instruments des politiques environnementales et en particulier aux instruments économiques. Elle avait pour objectif de renforcer la lutte contre l'effet de serre et de mieux maîtriser la consommation de l'énergie. Elle s'inscrivait dans le cadre de nos engagements internationaux et représentait une mesure importante du volet du Programme national de lutte contre le changement climatique consacré aux entreprises.

Instrument d'incitation à la prévention, la TGAP devait être élargie aux consommations intermédiaires d'énergie. L'opération était conçue à prélèvements constants, puisque les ressources engendrées devaient contribuer à la réduction des prélèvements obligatoires sur le travail.

L'élaboration du dispositif avait fait l'objet d'une concertation approfondie avec l'ensemble des acteurs concernés et notamment des industriels. Les modalités d'application du dispositif devaient permettre de concilier l'objectif environnemental et le maintien de la compétitivité dans le cadre international, comme dans les autres pays européens qui avaient mis en place une écotaxe énergie. Le couplage entre la taxation et le recours à des engagements sanctionnables devait permettre ainsi de parvenir à l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre y compris dans le cas des entreprises fortement consommatrices.

La recette attendue de cette extension de la TGAP aux consommations d'énergie des entreprises était estimée à environ 580 millions d'euros en 2001, soit 0,09 % de la valeur ajoutée brute des entreprises. L'efficacité économique et environnementale du dispositif proposé, si l'on en juge par la valeur de la taxe carbone marginale implicite (environ 40 euros par tonne de carbone), devait être forte. La TGAP énergie a été invalidée par le Conseil constitutionnel qui a considéré que les taxations qui en résulteraient seraient contraires au principe d'égalité devant l'impôt.

qu'à partir d'un certain niveau, par exemple⁽⁴⁷⁾. Ce seuil n'est cependant pas nécessairement le niveau atteint antérieurement. De même, sur un marché, les autorisations administratives peuvent être attribuées gratuitement pour tout ou partie des émissions antérieures à l'ouverture du marché (le complément étant soit payant soit vendu aux enchères). Ce choix, qu'il concerne la taxe, le marché de droits ou la subvention, renvoie à ce que l'on appelle parfois droits historiques ou du « grand-père », pour se référer au « *grandfathering* » anglo-saxon. La prise en compte des droits historiques permet une meilleure maîtrise des transferts que provoque la modification du système de prix. Ces transferts peuvent être substantiels, particulièrement si cette modification des prix est non anticipée. Des transferts qui touchent les entreprises et les citoyens améliorent l'acceptabilité des politiques, et donc leurs chances de succès.

Une plus grande acceptabilité par les entreprises est censée faciliter le passage d'accords volontaires, auxquels on peut trouver des aspects pédagogiques utiles, mais qui ont peu de chances d'aller au-delà de l'évolution au fil de l'eau et d'être à la hauteur des enjeux.

L'acceptabilité par les ménages peut être aussi améliorée, comme certaines suggestions du rapport 2001 au Conseil national des transports le montrent. Une suggestion est celle d'un système (apparemment viable) de cartes à puce, donnant à chaque automobiliste un crédit gratuit de carbone fossile mais permettant la facturation, au-delà de la limite autorisée, d'une taxe carbone. Il est clair que pour l'ordre de grandeur de la valeur de la taxe carbone envisagée dans la première période Kyoto (qui correspond à un surcoût de quelques centimes d'euro par litre d'essence), l'opération a peu de sens. Mais elle pourrait considérablement améliorer l'acceptabilité politique d'un effort marginal supérieur.

Discutons plus avant la question, en développant l'argumentaire favorable à la reconnaissance des droits historiques.

Une première évidence : les quotas nationaux issus de l'accord de Kyoto sont fondamentalement marqués par la logique des droits historiques, puisqu'ils ne modifient pas ou très peu la hiérarchie internationale des émissions de GES par tête. Le problème de l'antériorité des droits, même s'il ne se pose pas dans les mêmes termes à l'intérieur des nations qu'entre les nations, fait écho à des questions similaires. De même que l'on ne peut « blâmer » les États-Unis d'avoir choisi un développement engendrant de fortes émissions de gaz carbonique, avant que l'on en connaisse les inconvénients, de même l'on ne peut « reprocher » à un producteur d'électricité d'avoir autrefois développé de façon prioritaire les centrales à charbon. Il

(47) Une franchise sur les premières unités de pollution correspondrait à une distribution initiale gratuite d'une partie des permis. Cependant, une taxe et de larges exemptions ne conservent pas tous les avantages d'un système de permis avec allocation gratuite : il n'y a pas d'incitation à réduire au-delà du seuil d'exemption. On peut aussi coupler le dispositif avec une subvention.

est possible de dépouiller l'argument d'une connotation morale qu'on peut juger inappropriée en la matière. D'abord, dans ce domaine comme dans d'autres, les droits historiques ou droits acquis relèvent souvent d'une sorte de « contrat implicite », sans fondement juridique, mais qui a des effets distributifs que l'on ne peut rayer d'un trait de plume. De plus, il se peut, que toutes choses égales par ailleurs, le retrait du droit ait non seulement des effets distributifs non justifiés ou non désirés, mais aussi des *effets néfastes du point de vue de l'efficacité économique*⁽⁴⁸⁾. Dans les conditions réelles du fonctionnement imparfait des marchés financiers, la suppression rapide des droits historiques affecterait les performances économiques des entreprises, dans des proportions qu'exacerberait la compétition internationale. C'est du moins l'avis qui prévaut généralement, même si trop peu d'études sont consacrées à ce sujet important. C'est sans doute à cette opinion qu'il faut attribuer le choix d'exemption du volet énergétique de la TGAP en France ou bien l'option, dans le cadre de la Directive de l'Union européenne en préparation, de distribution gratuite de permis d'émissions, ou encore le choix britannique d'un système basé sur le volontariat, mais en fait fortement subventionné.

Les critiques du système soulignent que l'allocation gratuite de droits à laquelle conduit la reconnaissance des droits historiques, revient à moyen terme à donner une rente injustifiée aux entreprises concernées et à bloquer l'accession aux marchés de nouveaux entrants. Ils notent également, avec raison, qu'une allocation substantielle d'autorisations d'émissions négociables gratuites au secteur de production de l'électricité baissera son coût moyen et non son coût marginal et n'allégera qu'imparfaitement le coût de la taxation carbone pour les clients en aval.

La question ne peut être tranchée de façon uniforme et par une prescription simple à validité générale. Il faut reconnaître que la question des droits historiques se pose différemment, d'une part, à court et à moyen termes et, d'autre part, selon les modalités de la concurrence dans les secteurs envisagés. À moyen terme, où les prix reflètent, sous les hypothèses liées de concurrence parfaite et de rendements constants, à la fois les coûts moyens et les coûts marginaux, l'introduction d'une taxe carbone équivaut à une modification du système de prix à laquelle l'entreprise s'adapte mais qui ne la pénalise en aucun sens clair : la rente associée à une allocation gratuite des droits est, à ce terme et sous les hypothèses faites, injustifiée. À court terme, la substitution d'une taxe carbone à une autorisation administrative éventuellement contraignante mais gratuite, affecte normalement le profit de l'entreprise. Ceci est particulièrement vrai si la mesure n'a pas été suffi-

(48) Par exemple, même dans le monde simplifié de la théorie normative de premier rang (« *first best* »), le passage d'une situation d'allocation gratuite de droits d'émissions négociables sur un marché convenablement organisé à une situation de taxation, qui n'aurait aucun effet sur l'incitation marginale de l'entreprise, peut, si la production requiert un coût fixe, conduire à la fermeture de l'entreprise, même si celle-ci n'était pas socialement souhaitable.

samment anticipée, alors même qu'elle accroît vraisemblablement les besoins de financement pour des investissements plus adaptés, et donc les besoins d'autofinancement, dans un marché financier imparfait. Des allocations gratuites de permis en présence d'un marché de droits, ou des exemptions fiscales, voire des subventions dans d'autres contextes, sont alors au moins temporairement justifiables. La forme de la concurrence, et en l'occurrence ses aspects internationaux, joue aussi un rôle dans l'évaluation de l'opportunité d'une certaine gratuité des droits. Selon qu'elle conduit à des prix qui s'égalisent aux coûts marginaux (ou qui les reflètent), ou par exemple qui répondent à des forces de rappel vers les coûts moyens, les effets d'une éventuelle rente de gratuité devront être appréciés de façon très différente. Des droits qui seraient gratuitement accordés à une entreprise qui est en concurrence sur le marché international avec des entreprises non soumises à la législation carbone lui permettront, dans les cas de compétitivité limite, simplement de survivre.

En conclusion, le « *grandfathering* », ou la reconnaissance de droits historiques et l'allocation de permis initiaux en fonction des émissions récentes peut constituer une réponse à un vrai problème, celui d'une transition douce dans la mise en place de politiques impliquant des modifications substantielles des prix et des flux financiers. Trois points mis en exergue par la discussion peuvent être rappelés.

La reconnaissance des droits historiques ne constitue qu'une solution partielle aux problèmes de compétitivité et d'acceptabilité, puisqu'elle ne protège qu'imparfaitement les secteurs aval des modifications des coûts marginaux des secteurs amont (par exemple, l'industrie métallurgique vis-à-vis du secteur électrique).

Si elle est plaidable, la reconnaissance des droits historiques n'implique pas la reconduction à l'identique de la situation initiale. Ainsi, la détermination du pourcentage de reconduction des droits antérieurs qui, par exemple, laisserait inchangé ou affecterait d'un certain pourcentage le profit à court-moyen terme de l'entreprise, dépend de toute une série de paramètres et en particulier de la forme de la concurrence existant dans le secteur considéré. C'est donc largement une question empirique, qui doit faire l'objet d'une étude au cas par cas. De même, le choix de l'exemption, ou de la taxe contre la subvention, ne se pose pas de la même façon pour des grandes entreprises ou pour des petites, beaucoup plus contraintes dans leur appel au financement extérieur.

De plus, les raisons qui conduisent à reconnaître à un moment donné les droits historiques ne plaident pas pour leur perpétuation indéfinie. *Avec le temps (et sans doute assez rapidement), la proportion des permis mis aux enchères doit s'accroître, et/ou le niveau d'exemption doit décroître, pour rendre justice au caractère collectif du droit de propriété qu'ils reflètent et pour éviter les barrières à l'entrée, qu'ils risquent peu à peu d'ériger.* Le passage progressif à une fiscalité carbone impliquant des rentrées fiscales significatives fera alors entrer la réforme fiscale en bonne place sur l'agenda politique.

Troisième dimension de la décision publique pour la mise en œuvre des politiques climatiques : le point d'application des mesures. Pour garder à la discussion une certaine simplicité, concentrons-nous, en nous limitant aux émissions provenant du carbone fossile, sur les deux grands types polaires de solutions : *solution amont* et des *solutions aval*.

La solution « amont » conduirait à taxer l'ensemble des producteurs et des importateurs de carburants fossiles ou à répartir des droits entre eux. La mesure revient à pénaliser l'usage du carbone, en quelque sorte, à la source. De cette façon le surcoût serait répercuté sur l'ensemble des utilisateurs aval (producteurs d'énergie, automobilistes, consommateurs de fioul domestique) qui, et ceci est approximativement indépendant du mode d'allocation en amont, supporteraient le coût additionnel.

Les solutions traquant les émissions à « l'aval » ont apparemment beaucoup d'inconvénients par rapport à la précédente. Elles requièrent une comptabilité au niveau des unités émettrices. Cette comptabilité n'est pas absolument requise avec des solutions amont, en tout cas pour le carbone fossile (le problème est sans doute différent pour les autres GES que le CO₂)⁽⁴⁹⁾. Des solutions « aval » induisent, compte tenu de la non-uniformité du signal-prix, des réponses moins efficaces du système économique dans son ensemble, même si des corrections fiscales appropriées peuvent limiter cette inefficacité. C'est pourtant une politique de contrôle par l'aval, venant en sus de politiques nationales spécifiques, que tente d'organiser aujourd'hui une Directive de l'Union européenne, qui serait mise en œuvre (première période) entre 2005 et 2007. Cette directive met en place un marché européen de droits d'émission négociables pour un ensemble limité d'industries (production d'énergie pour les installations de puissance supérieure à 20 MW, production et transformation de métaux ferreux, industrie minière, fabrication de pâte à papier...). Le projet de TGAP sur l'énergie en France, invalidé par le Conseil constitutionnel reposait lui aussi sur une démarche « aval ».

Quatrième dimension : celle des mesures d'accompagnement. L'adoption de solutions « aval » avec points d'application sectoriels crée une hétérogénéité du signal-prix dans l'économie. Les effets pervers de cette situation peuvent être atténués par des mesures d'accompagnement. Par exemple, dans le cas où l'action sur le système de prix reposerait sur un nombre de points d'entrée limités, ou bien lorsque l'on peut accroître le coût marginal de la production des biens polluants dans un seul secteur, l'effet systémique des mesures doit être contrôlé par des actions correctrices adéquates sur le système de prix⁽⁵⁰⁾.

(49) En ce qui concerne les autres GES, en particulier le méthane, la politique amont évoquée ci-dessus ne semble pas avoir d'équivalent. Tout ce qui vient d'être dit concernant les droits historiques est évidemment transposable, même si cette transposition requiert dans chaque cas une réflexion spécifique.

(50) Le fait par exemple, que les biens taxés soient substitués ou compléments d'autres biens polluants non taxés, justifie l'abaissement ou au contraire l'accroissement de leurs prix à la consommation. Voir à ce sujet Bernard, Fischer et Vielle (2001).

4.3. Les défis de la politique climatique en France et en Europe

Le paragraphe précédent souligne les différentes dimensions d'une politique destinée à concrétiser les objectifs de réduction des émissions de GES. Le type d'intervention (taxe, subvention, marché de permis d'émission négociables), l'ampleur des flux financiers entre l'État et les agents économiques ou entre agents économiques, c'est-à-dire l'étendue de la reconnaissance d'un droit d'antériorité, les points d'application des mesures (aval, amont, etc. et leur déploiement sectoriel, production d'énergie, transports, habitat), enfin les mesures d'accompagnement sont des variables résultant d'un choix politique.

Naturellement, les choix dans ces différentes dimensions ne sont pas indépendants. La subvention est bien sûr incompatible avec la négation des droits historiques. Une solution de type aval est plus compatible avec la reconnaissance de droits historiques qu'une solution amont. L'atténuation progressive des droits historiques est facilitée par l'approche aval pour le dioxyde de carbone.

L'articulation des choix dans chacune de ces dimensions doit viser à minimiser les coûts économiques et sociaux de l'adaptation. Dans le cas de la France et de l'Europe, l'un de ces coûts est lié aux pertes de compétitivité des industries « exposées » et intensives en carbone. Le problème de l'inégale participation à l'effort de réduction des émissions de GES dans le cadre de Kyoto est rendu plus aigu par le retrait américain de l'accord. L'équation est aussi compliquée pour les pays européens, puisque l'engagement pris globalement doit être décliné et différencié au niveau de chacun des États, sans trop affecter les conditions de concurrence au sein de l'Union. La conciliation de la nécessaire coordination, pour ne pas fragmenter le marché européen par des législations carbone divergentes, et de la nécessaire subsidiarité, chaque pays étant finalement responsable de ses émissions, pose des questions difficiles.

Il n'est évidemment pas dans l'objet de ce rapport de discuter l'ensemble de la politique de l'effet de serre au niveau français ou européen pour les prochaines années. À vrai dire, cette question est un des grands sujets de la politique économique dans cette décennie. Mais pour l'aborder, il faut nourrir par beaucoup d'informations quantitatives les considérations qualitatives faites ici⁽⁵¹⁾. La question pourrait justifier la mobilisation à l'échelon européen d'une « *task force* » jouant un rôle de stimulation et mise en cohérence des études⁽⁵²⁾. Celle-ci devrait être aussi chargée de définir et comparer une série de scénarios fondés sur des combinaisons différentes mais cohérentes des options envisagées plus haut.

(51) Le rapport du Commissariat général du Plan rédigé par Pierre-Noël Giraud constitue un premier pas dans cette direction (Giraud, 2002). Il faut aussi développer une comptabilité carbone mettant en évidence à un niveau suffisamment détaillé les contenus totaux (directs et indirects) en carbone des biens finaux.

(52) À l'image de la Mission interministerielle sur l'effet de serre en France.

En ce qui concerne la coordination européenne, il faut noter que la Directive européenne en préparation opère une sorte de préemption sur l'ensemble de l'architecture ultérieure. Il est difficile à un observateur d'apprécier l'ensemble de la réflexion qui a précédé l'option d'intervention sectorielle et le choix de la solution de marchés de quotas qu'elle propose de mettre en œuvre. Les sceptiques pourraient dire que ce choix reflète le prosélytisme d'une conversion européenne de fraîche date à une foi dont les propagateurs (américains) s'éloignent et qui surestime les mérites relatifs des marchés vis-à-vis de l'intervention fiscale. Mais peut-être ont-ils tort ? À cet égard, les tribulations du projet français de TGAP énergie, dont la maladresse dans le calcul des exemptions s'est révélée un défaut cardinal, a pu jouer un rôle dissuasif vis-à-vis d'instruments similaires. Sauf à remettre en cause le projet de directive, une démarche qui serait sans doute malvenue et tout à fait hors du sujet de ce rapport, il faut noter que :

- la mise en œuvre du marché, toute question d'allocation nationale des droits mise à part, suscitera des difficultés. L'expérience aura certes un coût, mais aussi une valeur pour l'avenir ;

- la prise en compte des droits historiques, et en conséquence le fait que la taxation carbone ne jouera qu'à la marge, diminuera les oppositions à la taxation différentielle (en fonction des contenus carbone) de l'électricité produite par les diverses filières, une solution que la critique reprochait à la TGAP d'écarter ;

- le ralliement de la Directive, s'il est confirmé, à une gratuité complète des droits, au moins pendant la première période, est discutable. Il ne résout qu'imparfaitement le problème de compétitivité dans le secteur aval, par exemple celui de l'industrie métallurgique ;

- en permettant d'afficher un prix de marché du carbone le système aura d'incontestables vertus. Paradoxalement, une de ses vertus sera de faire apparaître ses propres limites dues à son champ restreint à la fois dans l'espace productif et dans l'ensemble des gaz. La prise de conscience des inconvénients d'une action limitée dans le champ des acteurs économiques, devrait susciter des actions complémentaires, à la fois pour le dioxyde de carbone et pour les autres gaz.

Malgré tout, avec la Directive qui fera porter l'effort sur un sous-ensemble d'émetteurs, l'hétérogénéité des coûts marginaux de réduction des émissions restera assez grande dans l'économie à moyen terme. Elle peut être justifiée par des raisons techniques, politiques ou économiques : il importe de renforcer le signal-prix là où il peut stimuler la recherche de technologies plus performantes, ou déterminer l'adoption précoce de techniques dont l'amélioration passe par l'apprentissage. Reste que l'unicité du signal-prix doit demeurer la référence et la charge de la preuve rester à ceux qui s'en écartent.

4.4. La compétitivité de l'espace Kyoto

Il importe de revenir plus longuement sur le problème de compétitivité de l'espace Kyoto. En créant une taxe carbone dont l'assiette géographique est plus limitée encore par le retrait américain (environ un quart des 200 nations, dont le PIB représentait 42 % du PIB mondial en 1990, contre 62 % avec les États-Unis), le Protocole crée des distorsions de concurrence et des incitations à la délocalisation qui accroissent potentiellement son coût pour les pays signataires. Ce constat justifie une réflexion sur la question de *mécanismes compensatoires* rétablissant des conditions de concurrence plus satisfaisantes entre ceux qui souscrivent à Kyoto et ceux qui ne s'y associent pas. Ces mécanismes pourraient prendre la forme de la taxation des biens importés venant hors de la zone Kyoto au prorata de leur contenu en GES et de la détaxation à l'exportation des biens taxés à l'intérieur de l'Annexe B. L'instruction d'une demande en ce sens appellerait sans doute à un retour sur les principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) et, en particulier, sur les clauses concernant les procédés et méthodes de production qui prévalent depuis le GATT de 1947. Faut-il aller en ce sens ?

Quel que soit le sentiment que l'on ait *a priori* sur l'opportunité d'une démarche mettant en cause la séparation commerce/environnement, il est bien évident qu'un rapport sur les enjeux économiques de l'effet de serre ne peut l'éluider. On organisera la discussion de la façon suivante : on discutera de façon préalable l'intensité des distorsions de concurrence entre l'espace Kyoto et le reste du monde ; on examinera ensuite la légitimité intellectuelle d'une liaison commerce-environnement, on s'interrogera finalement sur l'opportunité d'une action auprès de l'OMC.

Les effets de diverses législations environnementales en place sur la compétitivité des industries qui y sont soumises n'est pas un sujet nouveau. L'examen comparatif d'un large échantillon des études existantes permet de mettre en évidence certains effets de délocalisations, mais faibles et jugés inégalement plausibles selon les études (Mulatu et *al.*, 2002). L'existence du Protocole de Kyoto pose cependant des problèmes qui, par rapport à ceux d'hier, sont d'une autre ampleur. Quel effet une taxe carbone aura-t-elle sur la compétitivité des industries de l'espace Kyoto ? La réponse est loin d'être claire aujourd'hui. D'abord, parce que les études sur ce sujet ne sont pas légion. Ensuite, parce que la réponse dépend, à la fois du niveau de la « taxe carbone » et de ses modalités de mise en œuvre. Les arguments de compétitivité sont souvent à l'arrière-plan des propositions donnant une large place aux « droits historiques » : ainsi l'argumentaire TGAP, en soulignant que les exemptions limitaient l'accroissement du coût moyen dans la sidérurgie, suggérait qu'elles n'affectaient pas sa compétitivité. Retenons simplement ici, en extrapolant sur les chiffres TGAP, qu'une taxe carbone accroîtrait le coût moyen dans la sidérurgie en France de 5 % environ pour chaque « tranche » de taxe de 80 euros

par tonne⁽⁵³⁾. Ce calcul devrait être relayé par beaucoup d'autres, mais il suggère la conclusion grossière suivante : la compétitivité de l'espace Kyoto serait peu affectée pour des niveaux d'effort réduits (taxe carbone de quelques dizaines d'euros) mais serait en tout état de cause sérieusement affectée, dans certains secteurs, pour des efforts de réduction notables (200 euros par tonne). Ces conclusions provisoires obtiendront à éclairer la question de l'opportunité de mise en place de protections compensatoires. Elles invitent à réexaminer la légitimité intellectuelle de la séparation traditionnelle entre commerce et environnement.

La conception intellectuelle qui sous-tend les accords du GATT de 1947, aujourd'hui prolongés dans le cadre de l'OMC, doit être rappelée. L'échange y est vu comme une procédure mutuellement avantageuse et les décisions internes de la production ne créent pas, pour reprendre un vocabulaire ancien, d'« externalités pécuniaires ». La logique intellectuelle de cette position, souvent contestée depuis quelque temps, ne serait-ce que par ceux qui suggèrent des normes communes dans les conditions de travail, est enracinée dans le « *mainstream* » de la réflexion économique sur le commerce international. Dans cette optique, la présence de bien collectif local, ou de biens environnementaux locaux dont les aménités concernent essentiellement tout ou partie d'un pays, n'affecte pas les conclusions. Et toujours dans la même logique, les atteintes à la souveraineté interne des États, comme celles auxquelles conduiraient des normes communes de conditions de travail, par exemple, sont difficilement recevables, sauf à arguer d'une interdépendance des préférences dont la réalité objective est difficile à cerner. *Les choses sont toutes différentes pour un bien collectif global*, comme l'est la qualité du climat : tout ou partie de l'avantage mutuel tiré des avantages de l'échange peut être annulé par le comportement de « passager clandestin (*free rider*) », d'une partie des participants à l'échange, vis-à-vis du bien collectif global. Par exemple, si les industries polluantes de l'Union européenne, celles qui sont par définition touchées par la taxe carbone, perdent des parts de marché au profit d'industries plus polluantes, hors de l'espace Kyoto, non seulement le bien-être européen en sera affecté (dans le cas d'un bien collectif local, ce coût serait la contrepartie d'une préférence interne à l'Europe que les règles du commerce, selon la doctrine traditionnelle, n'ont pas à internaliser), mais la pollution mondiale augmentera éventuellement. Ceci compromettrait la réalisation de l'objectif spécifiquement recherché au niveau européen (la diminution de la progression de l'effet de serre), et pourrait-on ajouter, mais ce n'est pas nécessaire à l'argument, diminuerait le bien-être mondial.

(53) Calcul effectué à partir du tableau page 23 de l'étude d'impact de l'extension de la TGAP aux consommations intermédiaires, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement.

Nous sommes à même, après ce bref rappel théorique, de discuter l'opportunité d'une action auprès de l'OMC visant à évoquer les moyens du rétablissement d'une concurrence équitable entre l'espace Kyoto et le reste du monde. Une rapide analyse suggère que cette action n'est sans doute pas impérative à court terme, puisqu'il reste beaucoup de flou sur l'action qui sera menée et sur ses effets compétitivité. Mais la réflexion indique sans ambiguïté que cette action serait légitime. Une demande de traitement particulier pour les pays signataires de Kyoto serait plaidable, sans contrevenir à l'esprit des accords qui régissent aujourd'hui le commerce. Que les industries des pays signataires de Kyoto perdent des parts de marché n'est pas, on l'a déjà dit, un argument recevable en soi dans le cadre des accords commerciaux multilatéraux. Mais la perte des parts de marché consécutive à l'absence de protection, en accroissant la concentration atmosphérique des GES, crée une externalité négative pour le pays et cet argument est lui éventuellement recevable au titre de l'article 20 du GATT⁽⁵⁴⁾. Qu'enfin, l'externalité s'applique à l'ensemble du monde, que le « bien-être social mondial » autant que celui des pays de l'Annexe B soit en cause renforce le plaidoyer (Neary, 1999 et Rieu, 2002).

Faut-il cependant faire une telle démarche ? Elle aurait à la fois des avantages et des inconvénients, mais les inconvénients l'emportent sans doute à court terme.

Des avantages d'abord. En posant assez rapidement le problème à la jurisprudence de l'Organe de règlement des différends de l'OMC, et en demandant un amendement des statuts de l'OMC, les pays signataires de Kyoto signaleraient la qualité de leur engagement et en accroîtraient la crédibilité. Ils pourraient ainsi adapter l'argumentaire suggéré dans le paragraphe précédent et demander des clauses d'exemption des règles d'accès au marché pour les exportations de pays refusant une discipline en matière de biens collectifs globaux, aux bénéfices avérés pour d'autres pays.

Des inconvénients. Une telle demande est aujourd'hui prématurée, puisqu'elle tendrait inutilement les relations avec les pays en développement (PED), à un moment où l'avenir du protocole requiert que tout soit fait pour l'élargir d'une manière flexible et avantageuse pour eux. Il est important de souligner à cet égard que, sous l'hypothèse de l'élargissement, dont on plaidera la cause plus longuement ci-dessous, le conflit potentiel sur cette question avec les PED, incorporés dans un espace Kyoto, disparaîtrait totalement.

(54) Le préambule de l'accord instituant l'OMC souligne explicitement que le commerce doit être compatible avec le souci de protéger et préserver l'environnement.

5. Kyoto : relance, améliorations et prolongements

Comment relancer Kyoto, comment l'améliorer, comment le prolonger ? Nous examinerons successivement ces trois questions.

5.1. Relancer Kyoto

On a déjà souligné que les mesures de réduction des émissions et la stimulation du progrès technique sont des compléments plutôt que des substituts. Cette analyse a un corollaire : tout plaide pour un partage d'un effort économique et financier donné, selon des clés à déterminer, entre R&D et réduction des émissions⁽⁵⁵⁾. En d'autres termes, *étant donné l'objectif d'effort collectif assigné à Kyoto, sa répartition entre réduction et stimulation de la recherche, trop biaisée en faveur de la première, est insatisfaisante*. La carence du dispositif Kyoto en la matière étant patente, il faut d'ores et déjà essayer d'y remédier. Pour cela, les pays ayant ratifié Kyoto, ou au moins une partie d'entre eux, devraient s'engager dans des actions conjointes de recherche collective sur les technologies sans carbone⁽⁵⁶⁾. Une initiative européenne en ce sens, proposant une coopération selon des modalités de partage des coûts et des résultats à déterminer, serait particulièrement bienvenue.

Autre problème urgent, celui des pays en développement. Répétons les convictions affirmées précédemment. En premier lieu, la non-participation des pays du Sud, en limitant l'aire de la « taxe carbone », accroît les coûts des pays du Nord, d'abord parce qu'elle augmente le niveau de la taxe permettant l'atteinte d'un objectif quantitatif donné, ensuite parce qu'elle accroît l'incitation à la délocalisation. Les mécanismes MDP, dont le mérite est de maintenir le Sud dans la négociation, sont de ce point de vue peu satisfaisants. En second lieu, les pays du Sud *ont raison de refuser un effort coûteux à ce stade*. Demander à l'Inde de payer pour réduire ses émissions par tête, très inférieures à celles des États-Unis, est proprement choquant.

Pourtant des solutions mutuellement avantageuses existent : la participation des pays du Sud, dans des conditions attrayantes pour eux, réduit aussi considérablement le coût de la réduction pour les pays du Nord. Toutes les analyses convergent sur ce point. Par exemple, la simulation faite au moyen du modèle GEMINI E3⁽⁵⁷⁾, sur un Kyoto élargi à l'ensemble des pays du monde et où les droits initiaux sur le marché des permis sont répartis au prorata de la population, illustre, de façon spéculative certes mais spectaculaire, une conciliation à moyen terme de *l'équité et de l'efficacité*.

(55) Idéalement, une part de l'effort devrait être consacrée à l'adaptation, mais l'action sur ce volet est aujourd'hui généralement prématurée.

(56) Ces actions passeraient éventuellement par le secteur privé mais pourraient redonner un sens à la création d'institutions collectives ambitieuses (Commissariat international à la recherche sur les énergies sans carbone ?), dont le caractère trop étroit de l'espace national a diminué l'attractivité.

(57) Voir le complément de Criqui, Vielle et Viguié à ce rapport, ainsi que Bernard (2001) et Criqui et al. (1999).

Sur un marché mondial des permis avec droits proportionnels à la population, le prix des permis serait par exemple divisé par deux ou trois en 2040, par rapport à sa valeur sous une hypothèse Kyoto prolongé sans participation des PED ; le coût pour l'Annexe B lui serait divisé par trois tandis que les transferts au reste du monde seraient proches de 0,5 point de leur PIB.

Même si, à long terme, comme on le verra plus loin, la situation est moins simple, on voudrait ici *faire partager la conviction que la participation à la lutte contre le changement climatique peut aujourd'hui être rendue attrayante pour les pays en développement*. Sans entrer dans le détail de la discussion technique, la base des propositions pourraient s'appuyer :

- sur des quotas nationaux larges (avec « air chaud ») qui, dès lors que les pays bénéficiaires font des efforts minimaux, leur assurent un transfert positif⁽⁵⁸⁾,
- sur des quotas « non contraignants », dont le dépassement n'implique pas sanction mais dont l'amélioration donne l'accès au marché international de permis.

Plutôt que de se juxtaposer aux mécanismes de type MDP, les schémas que l'on esquisse s'y substitueraient. Ils devraient sans doute, afin de ne pas exacerber les difficultés de mise en œuvre d'un marché international de droits auquel les États-Unis ne participeraient pas, s'accompagner d'un relèvement des objectifs de l'Annexe B, étant entendu que le coût d'observance en serait *in fine* diminué et que le système conduirait à des transferts significatifs vers les pays du Sud « vertueux ».

Enfin, pour lever la méfiance légitime des PED, vis-à-vis de « carottes » trop temporaires, ces schémas devraient donner des garanties à moyen terme, par exemple en affichant des principes qui, à moyen ou long terme, relèvent d'une logique (au moins partiellement) « égalitaire » (quotas indexés jusqu'à un certain point sur la population). On discutera ce point plus longuement plus tard.

L'exploration de la piste qui vient d'être rapidement suggérée constitue *une priorité absolue aujourd'hui*. Tout ce qui a été dit jusqu'ici – les effets prévisibles du développement sur les émissions totales de GES, le caractère étriqué de l'espace Kyoto, les limites que la compétitivité met à l'efficacité d'une politique environnementale dont la base est trop restreinte, le caractère mutuellement avantageux de l'élargissement plaidé – indique à quel point ce dossier sera décisif pour l'avenir des politiques de lutte contre le changement climatique. Soulignons aussi, bien que ce rapport laisse volontairement dans l'ombre les aspects géopolitiques du dossier, que la position de trois grands partenaires de cette négociation, l'Inde, la Chine et le Brésil, tous susceptibles de subir à l'avenir des dommages climatiques notables, constitue un facteur favorable au traitement réaliste du dossier qu'ouvrirait la proposition que l'on vient d'esquisser⁽⁵⁹⁾.

(58) Tout en restant dans la même logique, à « l'air chaud », on peut cependant préférer, comme l'économiste suédois Bohm, des transferts monétaires équivalents.

(59) Il faut noter, malgré le rôle effectif et potentiel du charbon dans l'économie, le succès des premiers efforts chinois en matière de réduction des émissions.

Les États-Unis peuvent-ils revenir à la table des négociations ? Il faut revenir sur le dossier. Évoquer d'abord les erreurs qui ont pu être commises ne relève pas de la suffisance, mais reflète simplement la nécessité du jugement *a posteriori* et la meilleure information sur laquelle il peut reposer. L'hypothèse la plus simple est que Kyoto a sans doute *trop demandé aux États-Unis*. La concession tardive de l'Union européenne sur le problème du marché de permis est une première reconnaissance de cette erreur. Il est cependant étonnant, *a posteriori*, que l'extrême réticence des citoyens américains à limiter leur consommation d'énergie n'ait pas amené à reconnaître à quel point la potion Kyoto était difficile à « avaler », toutes contingences électorales mises à part⁽⁶⁰⁾. Naturellement, demander au plus gros pollueur de la planète (6 tonnes d'équivalent carbone par habitant), par ailleurs le plus riche, une réduction de 7 % de ses émissions ne paraît pas déraisonnable. Évoquer sa responsabilité, comme celle des autres pays riches, dans les dommages que le changement climatique imposerait à d'autres pays, éventuellement beaucoup plus pauvres, n'est pas déplacé. Mais il s'agit là d'un argument « moral » qui ne tient pas compte de la donne économique, c'est-à-dire dans les termes de l'analyse précédente, des « consentements à payer » et des coûts. C'est bien ce qu'indiquent les études les plus récentes. Notons qu'aujourd'hui, compte tenu de l'inaction et de la croissance démographique et économique, la tendance américaine de progression des émissions entre 1990 et la phase 1 de Kyoto se situe autour de 25 à 30 %. Baisser de 30 à 35 % les émissions entre 1997 et 2012, c'est-à-dire selon un rythme de décarbonisation de 2 % par an, constitue une tâche bien difficile, vu l'inertie des équipements et des institutions, et ceci même si de fortes potentialités de réduction à coûts faibles ou négatifs existent dans le pays.

Il faut bien évidemment que les États-Unis reviennent à la table des négociations aussitôt que possible : il serait très présomptueux d'en indiquer les moyens, mais l'analyse qui suit, et en particulier la discussion de l'architecture d'un accord international amélioré, a pour but d'y contribuer. La stratégie apparemment la plus raisonnable dans l'immédiat est de tenter, par la négociation, de convaincre les PED de rejoindre les pays de l'Annexe B, dès que possible. Paradoxalement, l'absence des États-Unis, semble-t-il opposés à des solutions impliquant à court terme des transferts avantageux pour les PED, ou à des arrangements égalitaires à long terme, pourrait rendre cette négociation plus facile.

(60) Malgré l'apparente contradiction entre les positions du candidat Al Gore et du président élu George W. Bush, la plupart des observateurs s'accordent à penser qu'un autre résultat des élections américaines n'aurait sans doute pas fondamentalement changé la donne. On peut soutenir que cette position américaine reflète une mauvaise interprétation de leurs intérêts, étant donné le taux de substitution entre *leadership* moral et *leadership* militaire et le coût économique de ce dernier.

5.2. Améliorer Kyoto

Revenons à une donnée de l'analyse économique de l'effet de serre qui a fait l'objet de la première partie : la plupart des experts s'accordent aujourd'hui à considérer que la fonction qui évalue les dommages globaux en fonction de la concentration des GES est, dans les intervalles de concentration du carbone pertinents à court terme, linéaire et « plate ». Les dommages marginaux seraient donc relativement constants. Beaucoup d'économistes pensent que dans un tel contexte la comparaison, du point de vue de l'efficacité, d'une *politique de quantités* (fixer un objectif quantitatif convenablement choisi, ici, le meilleur selon un calcul d'espérance mathématique) et d'une *politique de prix* (donner aux agents un signal-prix conforme à l'espérance du dommage marginal) est alors défavorable à la première. Le complément à ce rapport rédigé par Philibert examine ce point en détail. L'argument peut être exprimé ainsi de manière intuitive : comme les coûts marginaux de réductions sont, exprimés dans la variable stock, rapidement croissants, alors que le bénéfice marginal est relativement constant, la rigidité de l'objectif quantitatif conduit à des accroissements de coûts importants et socialement inutiles, en cas d'aléa défavorable sur les coûts, alors qu'elle ne permet pas d'exploiter des opportunités de gains de bien-être importantes en cas d'aléa favorable⁽⁶¹⁾.

Cet argument a été invoqué, soit pour réfuter l'ensemble de l'architecture du Protocole de Kyoto, soit pour proposer des amendements. Il faut discuter ici la nature de l'argument d'abord, sa portée ensuite.

Il faut noter d'abord que les politiques de quantités avec marché de permis, on l'a déjà dit, constituent un premier mécanisme d'assurance pour les chocs internes spécifiques des participants. L'argumentaire en faveur des solutions « prix » s'applique donc à une incertitude structurelle et de moyen terme, plutôt que conjoncturelle, sur les coûts. Il appelle en outre nombre de réserves techniques⁽⁶²⁾, et, on doit garder à l'esprit, des réserves plus

(61) Dans le cas où l'incertitude reflète simplement de l'information asymétrique, et non de l'incertitude objective, l'argument reste similaire : la fonction du dommage espéré constitue le bon schéma d'incitations non linéaire qui concrétiserait la politique optimale en information asymétrique ; si cette fonction est linéaire, elle est bien approximée par une taxe linéaire sur les émissions, si au contraire elle est non linéaire et présente des effets de seuil, avec une pente élevée dans la zone seuil, elle est bien approximée par une contrainte quantitative.

(62) La nature technique de l'argument en faveur des solutions prix de Newell et Pizer (2000), cité précédemment, conduit à exprimer certaines réserves. Il repose sur une formalisation des coûts, fonctions de coût par période convexes, qui pose des questions d'agrégation intertemporelle : la procédure revient, semble-t-il, à surestimer les coûts d'une politique de quantités, en traitant des substitutions intertemporelles de l'effort, à coûts marginaux non actualisés voisins, comme la somme d'additions et de retraits marginaux dont les coûts diffèrent substantiellement. Enfin, les politiques de quantités ont des avantages qui ne sont pas pris en compte dans le modèle. Par exemple, on pourrait arguer qu'une certaine fluctuation des prix autour de leur valeur moyenne aura un effet positif sur l'incitation à la recherche (la « convexité en prix » de la fonction de recettes de l'innovateur ne semble pas cependant avoir des conséquences empiriquement validées).

fondamentales, au moins à long terme, l'argument néglige un des facteurs possibles d'impuissance des politiques de prix, à savoir le fait qu'elles transfèrent la rente associée aux énergies fossiles sans nécessairement réduire leur rythme d'extraction, une remarque qui poussée à ses limites disqualifierait les politiques de taxation.

L'argument invoqué en faveur des solutions « prix » ne constitue donc aucunement la critique dévastatrice de l'architecture Kyoto que certains voient en lui. S'il faut malgré tout retenir une leçon des discussions qu'il suscite, c'est que *une politique de quantités accroît la variabilité des coûts, au-delà de ce qui est souhaitable*. Il en est ainsi parce qu'un lissage insuffisant a des effets négatifs sur le bien-être, mais aussi sans doute parce que les acteurs de l'économie de l'effet de serre ont de l'aversion au risque de coûts, et qu'il est donc souhaitable, pour limiter l'équivalent certain de leurs coûts, de réduire leur exposition au risque. Combiner cet argument avec celui portant sur la forme de la fonction de dommages conduit souvent à recommander *un prix plafond* sur le marché des permis d'émissions. Cependant, l'analyse qui vient d'être faite laisse planer des doutes sur l'adéquation entre l'objectif et la mesure préconisée. On peut se demander s'il ne faut pas plutôt rechercher un prix plafond, non pour les permis, mais pour les GES, prix qui additionnerait le prix de marché de la ressource sous jacente (par exemple pétrole, gaz ou charbon pour le CO₂), et le prix du permis lui-même. En d'autres termes, le prix plafond du permis plutôt que d'être stable devrait idéalement fluctuer pour stabiliser le prix plafond global⁽⁶³⁾.

Résumons : diminuer, autant que faire se peut, les coûts de l'intervention est un facteur positif du succès de la politique environnementale. À cet égard, le recours à une politique qui fixe exclusivement des objectifs quantitatifs conduit à une variabilité des coûts qui appelle, pour diminuer la prime de risque, un mécanisme d'assurances. C'est ainsi que l'on peut regretter *l'absence d'une soupape de sécurité* dans le dispositif Kyoto et souhaiter son inclusion ultérieure (Kopp et al., 1997). Cette sécurité prendrait la forme d'une fourniture garantie de permis à un prix plafond, fourniture assurée quand le prix du marché dépasse ce prix plafond. On l'a dit, idéalement, il faut se demander si ce prix plafond ne devrait lui même pouvoir varier dans certains cas pour contrecarrer partiellement les variations significatives, disons pour faire bref, du prix de l'énergie. Les recettes correspondantes pourraient être recyclées par une instance internationale selon les méthodes éprouvées au niveau national, mais plus difficiles à concrétiser au niveau international.

(63) Cette proposition mériterait beaucoup plus de discussion théorique, puisqu'elle pose la question de la valeur du signal prix au comptant pour le marché de l'énergie, et de précisions pratiques, puisque les prix des divers supports de GES sont eux-mêmes susceptibles de varier de façon différente.

Un argument symétrique du précédent plaide pour que la valeur de marché, du marché des permis d'émission, des réductions opérées au-delà de leurs quotas par certains pays, ne soient pas excessivement aléatoires, et donc qu'un *prix plancher* des permis soit introduit⁽⁶⁴⁾.

Toutes insuffisances des politiques de quantités mises à part, le Protocole met en place des mécanismes dont le bon fonctionnement n'est pas acquis d'avance. Par exemple, le *préjugé favorable aux marchés des permis d'émission négociables* est fondé sur le succès d'expériences probantes à leur échelle, essentiellement le marché du SO₂ aux États-Unis (voir le complément à ce rapport rédigé par Cros et Gastaldo). Mais l'échelle des marchés internationaux que met en place le Protocole de Kyoto est tout à fait autre et rien n'assure que tel ou tel réglage, qui s'est avéré favorable dans un contexte particulier, le soit très généralement. Par exemple, le « *banking* » ou report de crédits d'émissions qui permet un lissage temporel de l'effort, peut compromettre dans certaines circonstances une stabilisation convenable des anticipations. Le précédent favorable du marché du SO₂ ne doit pas faire oublier le temps historiquement nécessaire à la mise en place des marchés financiers existants. Il y a donc, c'est un mérite non un défaut, un aspect *expérimental* dans les mécanismes mis en place⁽⁶⁵⁾.

À cet égard, un encadrement par un prix plafond et un prix plancher selon la logique discutée ci-dessus, aurait d'autres vertus que le lissage intertemporel des coûts, seul placé jusqu'ici sous les feux du projecteur (Cournède et Gastaldo, 2001).

D'abord, il contribuerait, et ceci ne serait peut être pas la moindre de ses vertus, à *encadrer les anticipations, permettant ainsi de parer au risque de volatilité* d'un marché dont les rares expériences faites à ce jour ont montré la réalité⁽⁶⁶⁾.

Ensuite, notons que la proposition de soupape de sécurité, si elle introduit une régulation en prix dans un système basé sur l'attribution d'objectifs quantitatifs, ne constitue pas un reniement de l'architecture Kyoto. Le prix plafond peut être vu comme un mécanisme de sanction en cas de dépas-

(64) La logique de ce prix plancher n'étant pas exactement symétrique de celle du prix plafond, le problème de son indexation sur le prix des ressources énergétiques mériterait une discussion spécifique.

(65) Des propositions ont été faites pour éviter les « *junk permits* » provenant d'États ne respectant pas leurs engagements par Victor (2000). Notons aussi l'intérêt de solutions déjà adoptées, par exemple, celle d'une réserve pour la période d'engagement, un mécanisme méconnu mais essentiel : tout pays doit garder en réserve une partie importante de ses permis d'émissions initiaux. Mais les pays acheteurs peuvent également vendre (temporairement) une partie de leur quantité assignée (10 %). On préserve l'intégrité environnementale du marché (plus question d'inonder le marché avec des permis dont le pays aurait besoin pour couvrir ses émissions), tout en assurant sa liquidité. Une entreprise qui dépasse ses objectifs mais serait située dans un pays acheteur net aurait quand même accès au marché international.

(66) La volatilité de prix observée sur le marché américain du SO₂ est quelque peu inquiétante.

sement des quotas des pays (il avait été envisagé comme tel dans les négociations antérieures sans être cependant adopté). La « soupape de sécurité » constituerait un substitut des mécanismes d'observance, que Kyoto a réussi à rendre juridiquement contraignants mais dans le cadre de dispositifs qui laissent subsister des zones d'ombre. En l'absence de prix plafond, un pays qui finalement rechigne à l'effort demandé pourrait simplement reporter les réductions prévues, et subir, comme le prévoient les engagements internationaux pris à Marrakech, une pénalité faisant jouer un multiplicateur : toute tonne manquante doit être « récupérée » dans une proportion supérieure (1,3) pendant la deuxième période d'engagement. Mais, en l'absence de date butoir, et malgré l'interdiction de participation au marché des permis que le défaut déclencherait, les dettes environnementales pourraient être cumulées et un jour devenir irrécouvrables.

5.3. Prolonger Kyoto

Comment prolonger Kyoto ? Les améliorations proposées ci-dessus touchent à l'architecture, et principalement à ses aspects statiques. Pour répondre à la nouvelle question posée, il est nécessaire de réintroduire simultanément la dynamique intertemporelle de l'accord et la légitimité du « *grandfathering* » international que Kyoto phase 1, introduit.

Kyoto peut soutenir deux interprétations extrêmes. *A minima*, il relève de l'accord mutuellement avantageux, qui tient compte des différences de coûts et d'exposition à l'effet de serre, et donc n'appelle pas nécessairement une participation universelle. Difficultés de la négociation initiale mises à part, la renégociation de l'accord, après la période contractuelle, est soumise à de nombreuses inefficacités potentielles, comme toute négociation séquentielle. Nous n'en dresserons pas ici la liste exhaustive, mais on retiendra l'une d'entre elles, une sorte de talon d'Achille assez commun en l'occurrence, l'effet de cliquet (voir Freixas et al., 1985). Nous avons déjà examiné la question : comment sanctionner un pays qui ne s'est pas conformé à ses engagements ? Mais, le volet sanction masque un problème moins visible, mais peut être plus redoutable : quel sera le point de départ pour la renégociation de la période ultérieure ? La réponse est en principe on ne peut plus claire : faire comme si l'objectif antérieurement accepté avait été atteint. Mais il est peu réaliste de penser qu'il en sera bien ainsi : le « défaut » sera, bien entendu, un argument de la discussion ultérieure⁽⁶⁷⁾. Il donnera de fait vraisemblablement un pouvoir de marchandage et donc, au travers des accords successifs, une part accrue du surplus à la partie défaillante.

(67) Même si des dispositions prévoient une renégociation précoce qui limite le risque dans les premières étapes. Ainsi, le Protocole de Kyoto spécifie dans son article 3.9 que « Pour les Parties visées à l'Annexe I, les engagements pour les périodes suivantes sont définis dans des amendements à l'Annexe B du présent Protocole [...]. La Conférence des Parties agissant comme réunion des Parties au présent Protocole entame l'examen de ces engagements sept ans au moins avant la fin de la première période d'engagement ».

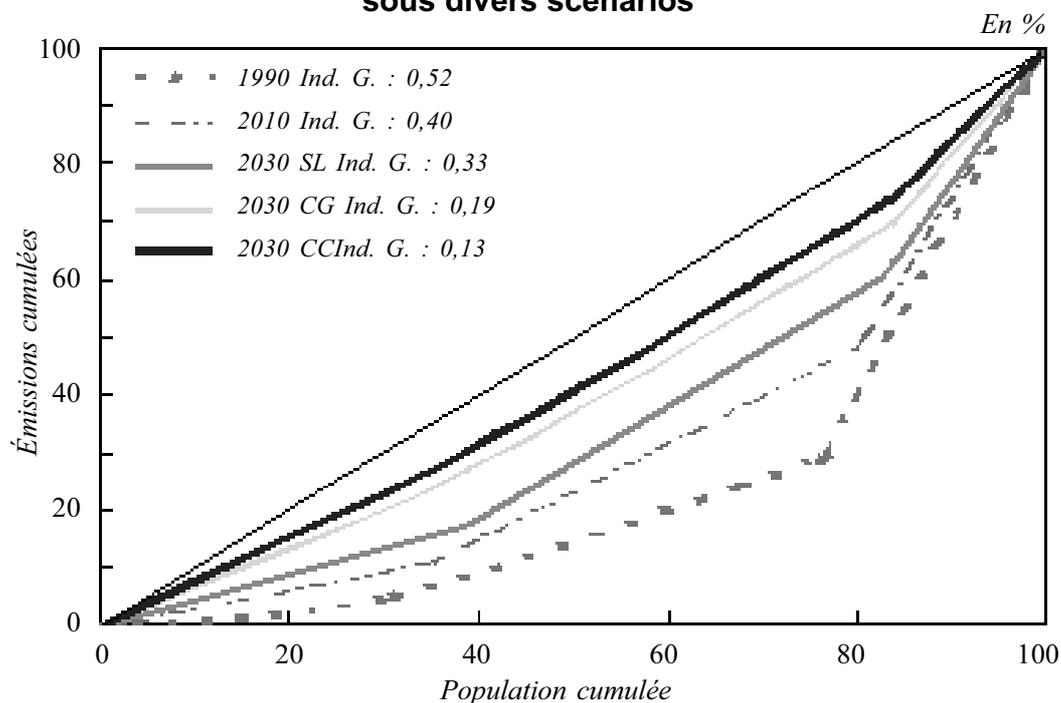
Une interprétation plus ambitieuse ou plus utopique de Kyoto est d'y lire en filigrane, comme de nombreux commentateurs l'ont fait, *l'annulation progressive des droits historiques (grandfathering)* dont la prise en compte conduit à ménager à court terme les gros émetteurs de GES⁽⁶⁸⁾. On substituerait ainsi à la logique des droits historiques une logique plus « égalitaire », conduisant par exemple à une affectation des droits nationaux d'émission sur la base de la population du pays. Une telle formule ne peut prétendre être « équitable », en l'un des sens profonds du terme auquel on peut faire référence, et encore moins résoudre le problème général et largement indéfini de la réalisation d'une justice internationale. Le développement économique fait aujourd'hui apparaître une nécessité de limiter l'utilisation d'un bien anciennement gratuit, nécessité qui suggère la définition des *droits nouveaux à l'échelle planétaire*. Une distribution égalitaire semble constituer, toutes choses égales par ailleurs, une base d'allocation du droit qui à la fois est assez naturelle et va dans le sens d'une plus grande « équité », quel que soit le sens exact que l'on donne à ce terme. Sans discuter plus longuement la bonne formule, on peut penser que cette utopie était bien en filigrane de Kyoto. On peut d'ailleurs attribuer les difficultés actuelles aussi bien au fait que cette logique égalitaire ait été trop présente, en faisant l'hypothèse qu'elle a contribué à accentuer l'effort demandé aux États-Unis au-delà de ce qui était politiquement réaliste ou bien, au contraire, que son explicitation aurait contribué à susciter l'adhésion des pays en développement, en leur attribuant de « l'air chaud » aujourd'hui et en leur offrant des perspectives favorables à long terme.

Cette brève analyse suggère deux conclusions :

- la pérennité et la « soutenabilité » à long terme d'accords internationaux de type Kyoto serait considérablement améliorée s'ils incorporaient un accord sur *les principes de répartition de l'effort à long terme*. Un tel accord devrait statuer sur les droits de propriété implicites ou explicites qui finiront par émerger. En l'absence de cet éclairage, qui devrait s'accompagner d'un *ciblage indicatif* de l'objectif de long terme (et donc sans doute aussi de trajectoires indicatives), des comportements opportunistes, nuisibles pour l'efficacité de l'action, surgiront de façon récurrente. Quel que soit le principe adopté, même s'il doit rester simple, il n'exclut pas, tout au contraire, que la définition des trajectoires prenne en compte, dans la *transition*, d'autres considérations que celles incorporées dans la cible de long terme. Par exemple l'*indexation transitoire* sur la croissance (comme mécanisme d'assurance) est compatible avec une certaine égalité des droits inscrite dans la perspective longue ;

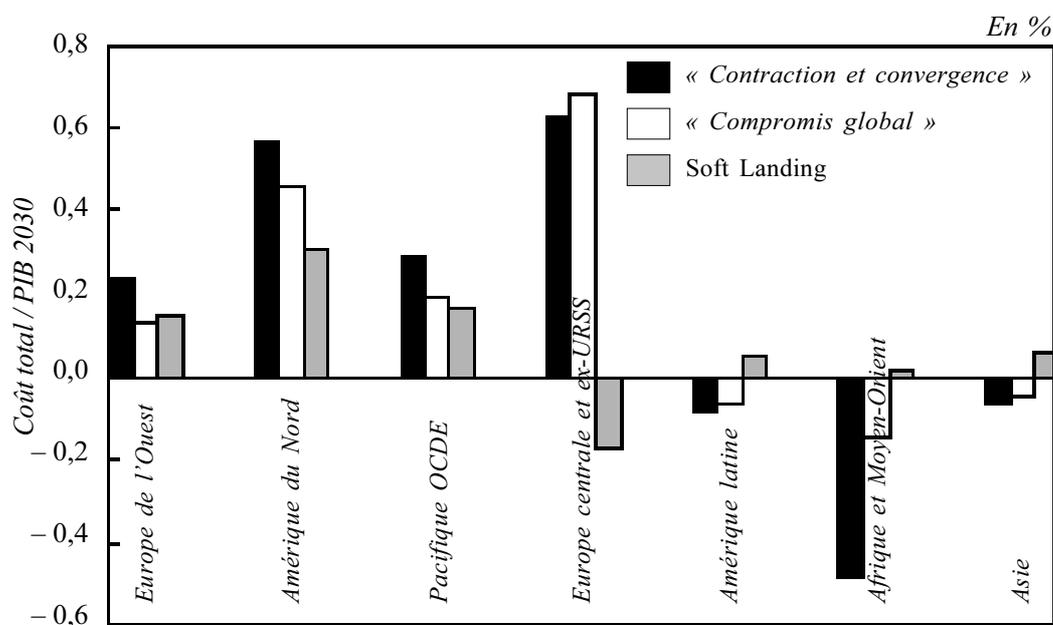
(68) L'Accord de Bonn stipule que les pays de l'Annexe I devront mettre en œuvre des actions domestiques « en visant à réduire les émissions d'une manière qui conduise à réduire les différences par tête entre pays développés et pays en développement tout en travaillant à l'objectif ultime de la Convention ».

5. Émissions cumulées en fonction de la population cumulée, sous divers scénarios



Source : Complément Criqui, Vielle et Viguier à ce rapport. Voir le complément pour la signification des scénarios *Soft Landing* (SL), « contraction et convergence » (CC), et « compromis global » (CG) ; Ind. G = indice de Gini.

6. Taux d'effort selon divers scénarios



Source : Complément Criqui, Vielle et Viguier à ce rapport. Voir le complément pour plus de détails.

• les arguments de simplicité, d'équité et d'adhésion politique à l'échelle de la planète donnent un statut « focal » aux *solutions de type égalitaire*. On peut penser qu'en tout état de cause l'inégalité résiduelle de la répartition des émissions fera débat. Et ce d'autant plus qu'elle pourrait rester forte, comme l'indique le complément de Criqui, Vielle et Viguiier à ce rapport. À titre d'illustration, cette inégalité est clairement visualisée sur le graphique 5, au travers de courbes qui retracent les émissions cumulées en fonction de la population cumulée et de leurs indices de Gini, pour des scénarios différents d'attribution de droits de propriété⁽⁶⁹⁾.

On a déjà souligné que les solutions égalitaires, qui permettent des transferts concrets vers les PED, ont des avantages pour les pays du Nord qui les rendent beaucoup plus politiquement réalistes qu'il n'y paraît. Le surcroît d'efficacité que ces solutions déterminent à court terme, dès lors qu'elles suscitent l'adhésion des PED, a une contrepartie à long terme⁽⁷⁰⁾. Des politiques égalitaires imposent cependant des coûts inacceptables à certaines parties (Russie) compte tenu de leur « consentement à payer » probable : comme le montre le graphique 6 tiré du complément de Criqui, Vielle et Viguiier qui indique les efforts demandés à l'Amérique du Nord, ainsi qu'à l'ex-bloc soviétique à un horizon de moyen terme, sous des scénarios visant à une convergence des émissions par tête (voir aussi Germain et Van Steenberghe, 2001).

La combinaison de ces deux remarques amène à recommander d'élargir les accords de court moyen terme, type Kyoto, pour leur adjoindre un *accord* non sur le montant mais *sur les principes* de l'allocation des droits de propriété portant sur les droits d'émissions à l'horizon de 2050-2070. Quelle que soit la forme exacte de ces principes, le mode d'allocation doit rester *simple* et il semble devoir relever d'un *compromis entre la logique d'attribution égalitaire et celle de l'acceptabilité*⁽⁷¹⁾.

On ne peut traiter cette question de l'acceptabilité sans revenir sur un problème plus fondamental, celui de la participation. La pérennité d'un accord environnemental de type Kyoto, aussi bien conçu soit-il, est constamment menacée par le « *free riding* », le passage gratuit (plutôt que clandestin) que donne la défection. C'est *qu'il est impossible ici, d'exclure aussi peu soit-il, de l'usage du bien collectif produit par l'accord*. Pour la plupart des participants, le retrait est préférable à la participation, dès lors

(69) Dont l'un intègre comme objectif une convergence des émissions par tête au niveau planétaire, et conduit à la courbe la plus proche de la bissectrice.

(70) À long terme, l'acceptabilité politique de scénarios de convergence des émissions par tête peut être améliorée par la force que le « voile de l'ignorance », même très incomplet, donne à l'argument distributif qu'ils incorporent.

(71) On pourrait par exemple définir pour chaque pays, une population fictive tenant compte de sa population présente et future et de son degré d'exposition à l'effet de serre (la Russie ayant alors une population fictive supérieure à sa population réelle).

que les autres continuent à participer⁽⁷²⁾. Ce risque ne disparaît pas même dans l'hypothèse d'une action limitée, mais s'accroît avec l'ampleur de l'effort demandé. Bâtir un ordre international, lorsque les raisons d'y participer sont si fragiles, sera difficile. Ne faut-il pas, pour le renforcer, élargir l'espace des accords ?

La réflexion entamée précédemment sur les relations entre commerce international et biens collectifs globaux, partait de la nécessité de préserver l'efficacité de l'effort environnemental entrepris par un sous ensemble de pays (les pays signataires). Mais l'enjeu de cette réflexion, qui conduisait à *reconsidérer le bien-fondé de la séparation des champs du commerce et des biens environnementaux globaux*, est plus large. On doit s'interroger : en l'absence de toute instance mondiale de gouvernement, les accords internationaux concernant le commerce et ceux concernant les biens publics globaux devraient-ils, idéalement, être globalisés ? On se limitera ici à quelques remarques.

La réflexion économique suggère que l'extension du domaine de la négociation accroîtrait en l'occurrence l'espace des accords mutuellement avantageux, une conclusion que n'invalident pas, semble-t-il, les théories les plus réalistes de la négociation aujourd'hui disponibles.

La suggestion, qui devrait bien entendu être précisée par des études complémentaires, n'implique pas que les travaux préparatoires à un accord global ne pourraient ou ne devraient être séparés. Elle n'implique nullement que les agences techniques, l'OMC et une éventuelle future agence de l'environnement, devraient fusionner.

Même si l'on admet que cette globalisation des compromis sur le couple des politiques commerciale et environnementale est bonne du point de vue de l'efficacité, elle change aussi le pouvoir de marchandage de chacun des partenaires. En l'occurrence, compte tenu du contentieux Kyoto, elle le modifierait sans doute en faveur de l'Europe et au détriment des États-Unis.

L'évaluation de la faisabilité et de l'opportunité diplomatique d'actions en ce sens dépasse bien sûr le cadre de ce rapport. Il convenait cependant de faire état de la conviction qu'un compromis environnemental de type Kyoto est nécessairement fragile et qu'il ne peut être renforcé qu'en étant couplé à d'autres arrangements internationaux (commerce, autres accords environnementaux) moins soumis au risque de « *free-riding* ». En d'autres termes, *une globalisation des compromis est bénéfique et, c'est le sentiment fort exprimé ici, nécessaire à la viabilité d'accords environnementaux réellement ambitieux.*

(72) On peut envisager des sanctions, dont Adly, Orzag et Stiglitz (2002) dressent une liste, jusqu'aux plus anecdotiques (exclusion des jeux olympiques ou de la coupe du monde de football).

6. Conclusion

Ce texte porte un jugement globalement favorable à l'action initialement envisagée à Kyoto, tant en ce qui concerne son ampleur que ses modalités. Rappelons d'abord les attendus de ce jugement.

6.1. Kyoto justifié

Tout d'abord, dans l'état actuel des connaissances scientifiques, il est difficile de prendre son parti des risques climatiques en reportant à une date indéterminée une action significative. L'*opportunité d'un accord international*, mettant en place la « quinquennalité » et les « logiciens » d'une politique de contrôle mondial des émissions des gaz à effet de serre *est peu douteuse*.

L'ampleur de l'effort initialement envisagé à Kyoto peut faire l'objet de débats. Il se situe dans une *fourchette raisonnable* au sens où les bonnes raisons pour estimer que Kyoto fait trop ou trop peu ne font pas démonstration. La nature de l'incertitude et l'horizon temporel rendent difficile l'analyse coûts-bénéfices. Mais les arguments concluant à un freinage trop rapide reposent sur un calcul économique simpliste, et ne sont pas plus convaincants, voire souvent moins, que ceux concluant à un freinage insuffisant. La vérité est que notre compréhension des effets climatiques de l'accroissement des concentrations atmosphériques est encore insuffisante, et que cette situation appelle la prudence. Par ailleurs, un affichage d'intentions vigoureux est nécessaire pour changer les anticipations tant des pollueurs que des innovateurs. Prudence et crédibilité recommandent, comme le visait Kyoto, d'aller bien au-delà d'actions symboliques.

Les mécanismes de flexibilité visent à abaisser notablement les coûts de mise en œuvre des politiques. Les marchés de permis d'émissions négociables constituent une innovation majeure, susceptible d'accroître beaucoup l'efficacité de l'action, même si le dispositif n'a jamais été expérimenté à cette échelle. Le rapport explicite en revanche les réserves qu'appelle la mise en place des « mécanismes de développement propres ». Plus généralement, l'*architecture* envisagée à Kyoto conduit à des engagements quantitatifs, idéalement trop rigides. Mais l'encadrement quantitatif est aujourd'hui trop décrié. La mise en place des solutions alternatives est, compte tenu des réactions probables de l'offre énergétique, plus difficile qu'on ne le réalise généralement. Une forme de *contrôle par les prix*, celle que cherche à concrétiser un dispositif de « soupape de sécurité », est cependant souhaitable. Par ailleurs, l'architecture Kyoto permet d'organiser de façon convenable la négociation et ouvre la porte à des transferts limités. Elle est *perfectible* et susceptible d'évolutions vers d'autres architectures « Kyoto compatibles ».

Même si ce rapport n'est pas compétent pour évaluer les aspects les plus politiques du dossier, en particulier pour apprécier la fermeté de la vo-

lonté politique d'une Europe placée en position de *leader* écologique, il souligne les coûts d'un renoncement à Kyoto et plaide au contraire pour tenter de faire vivre et d'améliorer le protocole. Cependant avant de reprendre les principales suggestions qui ont été faites en ce sens, il est utile d'évoquer plusieurs scénarios de l'après Kyoto, en commençant par deux scénarios extrêmes, Kyoto magnifié et Kyoto effiloché.

6.2. Kyoto magnifié

Nous avons esquissé, tout au long de ce rapport, les traits d'une gouvernance vigoureuse « post-Kyoto » Elle combinerait :

- des objectifs quantitatifs de type Kyoto, faisant l'objet d'un accord entre entités souveraines. Mais l'accord serait élargi à la définition de principes d'allocation de long terme des droits nationaux. Il serait assorti de perspectives provisoires de concrétisation desdits principes. L'égalité des droits pour tous les habitants de la planète conserverait une position focale dans la discussion, même si le compromis sur les principes de long terme devrait nécessairement concilier capacité de mobilisation et réalisme économique et politique, et refléterait donc l'exposition variable des protagonistes au risque climatique ;
- des assignations d'objectifs contraignants sur la période et de chemins indicatifs d'objectifs cohérents avec les perspectives de long terme ;
- la possibilité de réaliser les objectifs de la période, non seulement par des efforts de réduction interne mais aussi par des échanges sur des marchés d'émissions internationaux. À cet égard, la régulation de ces marchés par un prix plancher et un prix plafond, au travers de ce qui équivaut à une taxe s'appliquant aux dépassements et une subvention maintenant une incitation minimale à la réduction, devrait viser à encadrer les prix totaux des émissions GES et non le seul prix des permis. Le solde lié aux interventions serait géré collectivement et pourrait servir à la mise en place d'aides spécifiques aux PED, à la subvention d'une recherche internationale... ;
- la solidité de l'accord serait garantie par son inclusion dans un « *package deal* » d'accords internationaux incluant les accords de commerce, et définissant les règles du jeu d'une société internationale solidaire.

Une telle forme de gouvernance vigoureuse, dont on vient d'esquisser les règles, et qui mérite l'appellation de post-Kyoto relève t-elle de l'utopie ?

Reconnaissons qu'il y a effectivement derrière Kyoto, une utopie. C'est une utopie au meilleur sens du terme. Elle cristallise, autour d'une question jugée majeure, des espoirs de mise en place d'une gouvernance mondiale ambitieuse, car susceptible de concilier l'aide aux PED et la résolution d'un problème environnemental majeur. On a dit, pour la discréditer, que les modalités d'aide qu'elle mettrait en place ne sont pas les plus adaptées. Et il est vrai qu'il y a, dans l'absolu, de meilleures manières de soutenir le

développement que de disséminer, de façon plus ou moins égalitaire, des droits de propriété sur l'environnement. Mais, la mise en œuvre de ces moyens alternatifs demeure aujourd'hui encore bien plus improbable que celle du « super-Kyoto » esquissé ici, dont au moins l'instauration est plaidable du point de vue de l'efficacité. L'obstacle essentiel à ce que l'on a appelé l'utopie Kyoto est en fait la réticence d'une partie de la communauté internationale à l'égard de toute solution impliquant une redistribution significative des revenus sur la planète. L'état des lieux rend donc aujourd'hui l'avènement de cette utopie peu probable. Mais le mûrissement de la prise de conscience que susciterait un accroissement spectaculaire du danger du changement climatique, s'il était prouvé, pourrait lui redonner quelques chances.

6.3. Kyoto effiloché

À l'autre extrême, les effets de démonstration d'un club limité de nations, ne parvenant pas à convaincre l'essentiel de la communauté internationale de les rejoindre et restant minoritaires à la fois en nombre et en volume d'émissions, risquent de n'être ni très efficaces ni gratifiants. Pour ne pas perdre le soutien politique des citoyens inquiets de la faible valeur du ratio efficacité/coût d'un effort isolé, mais aussi tout simplement pour rester efficace dans l'état actuel des règles du commerce, l'effort des pays « vertueux » devrait rester assez limité. La « compétition par l'exemple » risque d'être fort modérée.

On peut craindre aujourd'hui que se profile une autre variante de Kyoto effiloché. C'est « l'air chaud » russe, plutôt que l'effritement de la politique des Européens qui va, en abaissant trop le prix des permis sur le marché, limiter l'effort. Ceci peut mettre en cause une de ses vertus cardinales, la crédibilité que l'affichage d'un prix carbone significatif donne à la politique climatique et la stimulation de la recherche qu'elle suscite. Jusqu'à la fin de la première période d'engagement, en 2012, l'Union européenne a une responsabilité déterminante pour contenir ces risques d'effilochement. Elle doit procéder de façon efficace à une réduction significative de ses émissions, tout en gérant la question de l'air chaud russe. Un certain nombre de suggestions faites ici s'inscrivent dans la logique de cette exigence.

6.4. Kyoto ranimé et concrétisé

Ranimer Kyoto c'est, pour l'Union européenne, afficher une détermination qui passe :

- d'abord, et c'est moins mineur qu'il n'y paraît, par un soutien approprié à l'affirmation d'une *autonomie intellectuelle* européenne, susceptible de remettre en cause la position souvent hégémonique des États-Unis dans le domaine des politiques climatiques (stimulation de la recherche, « *task force* » administrative européenne ?) ;

- ensuite par une réflexion sur la *compétitivité de l'espace Kyoto*, incontournable dans le contexte actuel. Cette réflexion renvoie aux contradictions croissantes entre, d'une part, les réalités des interactions entre échanges commerciaux et environnement et, d'autre part, les conceptions intellectuelles qui fondent l'OMC. Elle appelle un retour sur la question plus générale des liens entre commerce international et gestion des biens collectifs globaux. Plus spécifiquement, le rapport montre comment, à terme, la limitation de l'espace de la taxe carbone à une partie de la planète réduit considérablement l'efficacité des politiques climatiques. Il passe en revue les avantages et les inconvénients d'actions précoces à destination de l'OMC ;
- enfin et surtout, par un effort de consolidation des accords Kyoto. Ceci passe par l'adjonction d'un volet de coopération technologique sur l'effet de serre, et la construction d'un « espace Kyoto de la recherche technologique ». Les formes que devrait prendre la coopération suggérée sont très ouvertes, mais toute l'analyse, sur l'aspect décisif des novations technologiques, sur la répartition de l'effort entre réduction et recherche, sur les dimensions stratégiques de la question, en souligne l'importance et l'urgence.

Ce rapport n'a fait qu'aborder la question de la mise en œuvre ou de la concrétisation des politiques climatiques à l'intérieur de la France et de l'Union européenne, un sujet qui est périphérique au champ assigné au rapport. Il prend cependant position sur certains points :

- il préconise des *transitions douces*, susceptibles d'atténuer les coûts d'ajustements macroéconomiques de court terme. Ces transitions devraient être anticipées suffisamment à l'avance par les agents économiques et ne modifier que progressivement les droits de propriété implicites existants, reconnaissant donc de façon transitoire les droits historiques liés à l'antériorité ;
- même s'il admet que les premières actions sont à coût relativement faible, le rapport exprime certaines réserves sur l'ampleur d'un « double dividende » pour les politiques de l'effet de serre, ou du moins sur l'argumentaire et les preuves qui en ont été données jusqu'ici. Cette circonspection va de pair cependant avec la forte conviction que *le passage, qu'on souhaite ici progressif, à la fiscalité carbone met la réforme fiscale à l'ordre du jour*. D'une part, la mise en évidence d'inefficacités plus ou moins restées cachées jusqu'alors est susceptible de mettre en lumière des opportunités de réforme. D'autre part, le temps de la mise en place de la fiscalité carbone *constitue une période favorable à une restructuration de la fiscalité dans son ensemble* ;
- il recommande un retour sur les choix fondamentaux concernant le prélèvement de la taxe carbone. La « *conventional wisdom* » qui conduit à taxer « en aval » les grandes unités de production et d'une manière différente, peut-être « en amont », les émissions diffuses, mérite d'être soumise à une investigation critique approfondie.

Rappelons, finalement, les principales suggestions du rapport, pour relancer et prolonger Kyoto au-delà de 2012.

6.5. Kyoto relancé et prolongé

L'action menée dans le cadre de Kyoto ne prendra tout son sens que si elle peut rebondir en 2013, une échéance qu'il faut préparer dès maintenant. Le sentiment exprimé dans ce rapport est que l'ambition du Protocole de Kyoto ne pourra être pérennisée que si au moins une grande partie des PED est associée au prolongement de l'accord. Pour qu'il en soit ainsi, les pays de l'Annexe B peuvent et doivent, c'est le principal message de ce rapport, *présenter des solutions économiquement séduisantes aux PED*.

Ces solutions pourraient être plus ou moins inventives (comme expliqué dans le rapport). Mais pour être mutuellement avantageuses (abaisser le coût pour les pays riches et conduire à des transferts significatifs sur une période suffisamment longue vers les PED), elles devront être *généreuses à court terme* et donner de solides *garanties sur les règles du jeu à moyen terme*. Sans aborder les questions diplomatiques et géopolitiques au fond, ce rapport exprime la conviction qu'un accord sur la base des solutions suggérées est possible, dès lors que *les deux* conditions qui viennent d'être soulignées sont remplies. Fournir, dès aujourd'hui, un appui pour mettre en place dans les PED des systèmes performants d'inventaires constitue une priorité concrète.

Toujours à moyen terme, une forme de contrôle des prix des GES accompagnant le contrôle quantitatif, que ce contrôle relève de *la soupape de sécurité avec un prix plafond* ou qu'il fixe une borne inférieure à l'incitation avec un prix plancher, devrait être intégrée au dispositif. Mais le mécanisme sera d'autant plus satisfaisant qu'il stabilisera, par exemple, le prix total du carbone et non la seule « taxe carbone ».

Au-delà, l'accord pourrait à l'occasion évoluer vers des architectures qu'on a appelé Kyoto-compatibles, ou bien plus efficaces ou bien plus adaptées à l'économie politique de la négociation. Il faut, d'une manière ou d'une autre, résoudre beaucoup mieux qu'on ne le fait aujourd'hui *les inefficacités intertemporelles qui accompagnent l'effet de cliquet*. Il faut aussi faire que *l'espace de la taxe carbone s'élargisse à la planète toute entière*. Dans la logique Kyoto stricte, la solution de ces problèmes ne peut passer que, d'une part, par un accord sur les principes de répartition à long terme des droits d'émission et, d'autre part, sur une coercition pour la participation, dont l'instrument privilégié pourrait être la *globalisation de compromis* internationaux hors du domaine de l'environnement proprement dit. Ces problèmes ont d'autres solutions Kyoto-compatibles sur lesquelles on ne reviendra pas ici, mais que des études en cours, ou à susciter, doivent impérativement approfondir.

L'avenir des politiques climatiques soulève des interrogations : les États-Unis modifieront-ils leur position et si oui, quand ? Mais cet avenir est ouvert et appelle l'action, une action dont ce rapport a cherché à explorer les grands sentiers.

Références bibliographiques

- Aldy J.E., P.R. Orszag et J.E. Stiglitz (2001) : *Climate Change: An Agenda for Global Collective Action*, Centre on Global Climate Change, 11 octobre.
- Arrow K.J. et A.C. Fisher (1974) : « Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility », *Quarterly Journal of Economics*, 88, 2, mai, pp. 312-319.
- Bernard A. (1972) : *Calcul économique et planification*. La Documentation française, Paris.
- Bernard A. (2000) : *The Pure Economics of Tradable Pollution Permits*, Miméo, Conseil Général des Ponts et Chaussées, Paris.
- Bernard A. (2001) : *Vers une nouvelle architecture du Protocole de Kyoto : quelques simulations préliminaires effectuées avec le modèle Gemini E3*, Miméo, Conseil Général des Ponts et Chaussées.
- Bernard A., Fischer et M. Vielle (2001) : *Is There a Rationale for Rebating Environmental Levies?*, Resources for the Future, Document 0131, Washington DC.
- Boiteux M. (1976) : « À propos de la critique de la théorie de l'actualisation », *Revue d'Économie Politique*, 5, septembre-octobre, pp. 1-17.
- Bradford D. (2002) : *Improving on Kyoto: Greenhouse Gas Control as the Purchase of a Global Public Good*, Princeton, Mimeo.
- Commission européenne (2000) : *Communication sur le principe de précaution*, Bruxelles, février.
Disponible sur <http://www.waternunc.com/fr/dg11eu21.htm>.
- Conseil d'analyse économique (1998) : *Fiscalité de l'environnement*, La Documentation française, 198 p.
- Cooper R. (2001) : « The Kyoto Protocol, a Flawed Concept », *Environmental Law Reporter*, 31, pp. 11484-11492.
- Cournède B. et S. Gastaldo (2000) : *Combinaison d'instruments prix et quantités contre l'effet de serre*, Communication aux journées de l'Association française de sciences économiques, Marseille, septembre.
- Cournède B. et S. Gastaldo (2001) : *Comparaison des instruments prix quantités dans le cas de l'effet de serre*, Mimeo, Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie.
- Criqui P., S. Mima et L. Viguié (1999) : « Marginal Abatement Costs of CO₂ Emission Reductions, Geographical Flexibility and Concrete Ceilings: An Assessment Using the POLES Model », *Energy Policy*, 27.

- Daedalus (2001) : *Religion and Ecology: Can the Climate Change?*, n° spécial.
- Dupuy J-P. (2001) : *Le catastrophisme éclairé*, Le Seuil, Paris.
- Etheridge D., L. Steele, R. Langenfelds, R. Francey, J. Barnola et V. Morgan (1996) : « Natural and Anthropogenic Changes in Atmospheric CO₂ Over the last 1000 Years from Air in Antarctic Ice and Firn », *Journal of Geophysical Research*, 101, pp. 4115-4128.
- Fougeyrollas A, P. Le Mouel et P. Zagamé (2001) : « Semi Endogenous Growth in a Computable General Equilibrium Approach », *Computing in Economics and Finance*, 232, Society for Computational Economics.
- Fougeyrollas A., P. Le Mouel et P. Zagamé (2001) : *Endogenous Growth and Environmental Regulation: The Case of the Kyoto Protocol*, Mimeo, Université Paris I.
- Freixas X., R. Guesnerie et J. Tirole (1985) : « Planning Under Incomplete Information and the Ratchet Effect », *Review of Economic Studies*, 52, pp. 173-192.
- Germain M. et E. Van Steenberghe (2001) : *Constraining Equitable Allocations of Tradable Greenhouse Gases Emission Quotas by Acceptability*, Mimeo, CORE, Louvain.
- Gherzi F. et J-C. Hourcade (2002) : « The Economics of a Lost Deal: Kyoto, The Hague, Marrakesh », *The Energy Journal*, 22-3, pp. 1-26.
- GIEC (2001) : *Climate Change 2001*, 3 vol. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Giraud P.N. (2002) : *Effet de serre: modélisation économique et décision publique*, Rapport du groupe présidé par Pierre-Noël Giraud, Commissariat général du Plan, La Documentation française, Paris.
- Godard O. (1997) : « Les enjeux des négociations sur le climat », *Futuribles*, 224, pp. 33-66.
- Godard O. (dir.) (1997) : *Le principe de précaution dans la conduite des affaires humaines*, Éd. de la Maison des Sciences de l'Homme et INRA-Éditions.
- Godard O. (1999) : « Sur l'effet de serre » in *Nouvelle encyclopédie de bioéthique*, Hottois et Missa (dir.), Bruxelles, De Boeck Université, pp. 360-363.
- Godard O. (2002) : « Le changement climatique planétaire. Le commerce de permis d'émission au service de la protection d'un bien collectif », *Revue d'Économie Financière*, 66, pp. 75-100.
- Gollier C. (2001) : *The Economics of Risk and Time*, The MIT Press, Harvard, MA.

- Gollier C., B. Jullien et N. Treich (2000) : « Scientific Responsibility and an Economic Interpretation of the Precautionary Principle », *Journal of Public Economics*, 75, pp. 229-253.
- Guesnerie R. (2002) : *Long Run Discounting of Environmental Goods under Uncertainty*, Miméo, DELTA, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
- Ha-Duong M. (1998) : « Quasi-Option Value and Climate Policy Choices », *Energy Economics*, 20, pp. 599-620.
- Ha-Duong M., M. Grubb et J-C. Hourcade (1997) : « Influence of Socio-Economic Inertia and Uncertainty on Optimal CO₂-Emissions Abatement », *Nature*, vol. 390, pp. 270-274.
- Helioui K. (1999) : *Méthodes d'évaluation des politiques environnementales*, Association française des entreprises pour l'environnement, Paris.
- Henry C. (1974) : « Investments Decisions under Uncertainty: The Irreversibility Effect ». *American Economic Review*, 64, 6, décembre, pp. 1006-1012.
- Henry C. (2000) : *Growth, Intergenerational Equity and the Use of Natural Resources*, Mimeo, Ecole Polytechnique, Paris.
- Jacoby H.D. et A.D. Ellerman (2002) : *The Safety Valve and Climate Policy*, Report 83, Massachusetts Institute of Technology, Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
- Jonas H. (1990) : *Le principe de responsabilité*, Éd. du Cerf, Paris
- Keeling C.D. et T.P. Whorf (1998) : “ Atmospheric CO₂ Records from Sites in the SIO Air Sampling Network ” in *Trends: A Compendium of Data on Global Change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee.
- Kopp R., R. Morgenstern et W. Pizer (1997) : *Something for Everyone: A Climate Policy that Both Environmentalists and Industry Can Live With*, Resources For the Future, Washington DC.
- Kourilsky P. et G. Viney (2000) : *Le principe de précaution*, Rapport au Premier ministre, Odile Jacob, Paris.
- Lomborg B. (2001) : *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*, Cambridge University Press.
- Magné B. et M. Moreaux (2002) : *Long Term Energy Trajectories: Assessing the Nuclear Option in Response to Global Warming*, Mimeo INRA-LEERNA et Université de Toulouse 1.
- Meunier F. (2002) : *Perspectives technologiques pour les économies d'énergie*, Présentation au groupe « effet de serre », Conseil d'analyse économique, Paris, janvier.

- MIES (Mission interministérielle sur l'effet de serre) (2000) : *Programme national de lutte contre le changement climatique*, Paris.
- Milleron J-C., R. Guesnerie et M. Cremieux (1979) : *Calcul économique et décisions publiques*, Commissariat général du Plan, Paris.
- Mulatu A, R. Florax et C. Withagen (2002) : *Environmental Regulation and competitiveness: An Exploratory Meta-Analysis*, Mimeo, Vrije University, Pays-Bas.
- NAS (National Academy of Sciences) (2002) : *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*, Ocean Studies Board, Polar Research Board, Board on Atmospheric Sciences and Climate, National Academy Press, Washington DC.
- Neary P. (1999) : *International Trade and the Environment: Theoretical and Policy Linkages*, Mimeo, University College, Dublin.
- Newell D. et Pizer W. (2000) : « Regulating Stock Externalities Under Uncertainty », *Resources for the Future*, DP 9910, Washington DC.
- Nordhaus W.D. (1993) : « Rolling the 'DICE': An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases », *Resource and Energy Economics*, 15, pp. 27-50.
- Nordhaus W.D. (2000) : « From Porcopolis to Carbopolis: The Evolution from Pork Bellies to Emissions Trading » in *Emissions Trading*, Kosobud (ed.), John Wiley, New York, pp. 61-73.
- Nordhaus W.D. (2001) : *After Kyoto: Alternative Mechanisms to Control Global Warming*, Présentation à la session de l'American Economic Association et de l'Association of Environmental and Resource Economists, Atlanta, Georgie, 4 janvier.
- Nordhaus W.D. et J. Boyer (2001) : *Warming the World: Economic Models of Global Warming*. MIT Press, Cambridge MA.
- Philibert C. (1999) : « The Economics of Climate Change and the Theory of Discounting », *Energy Policy*, vol. 27, n° 15, pp. 913-927.
- Philibert C. (2000) : « How Could Emissions Trading Benefit Developing Countries », *Energy Policy*, vol. 28, n° 13, pp. 947-956.
- Philibert C. (2002) : *Evolution of Mitigation Commitments*, Agence Internationale de l'Énergie, Paris.
- Philibert C. et J. Pershing (2001) : « Des objectifs climatiques pour tous les pays : les options », *Revue de l'Énergie*, 524, février, pp. 92-104.
- Résolution sur le principe de précaution (2000) : *Sommet européen des chefs d'État et de gouvernement*, Nice, décembre.
- Rieu J. (2002) : *Politiques nationales de lutte contre le changement climatique et réglementation de la concurrence : le cas de la fiscalité*, Mimeo, Ministère de l'Écologie et du Développement durable, D4E.

- Thorning M. (2002) : *Kyoto Protocol and Beyond: Economic Impacts on EU Countries*. American Council for Capital Formation, Center for Policy Research.
- Victor D. (2000) : *Collapse of the Kyoto Protocol*, Princeton University Press
- Weitzman M. (2001) : « Gamma Discounting », *American Economic Review*, 91, 1, pp. 260-271.
- Weyant J. et J. Hill (1999) : « The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi Model Evaluation. Introduction and Overview », *The Energy Journal*, Special Issue on the Cost of the Kyoto Protocol.

Glossaire

- AI** scénario « accord initial » de Kyoto
- AIE** Agence internationale de l'énergie
- Annexe 1** Les pays qui s'étaient engagés à des cibles de réduction des émissions lors de la signature de l'Accord de Kyoto sont désignés par les pays dits « de l'Annexe 1 ». Il s'agit de trente-six pays industrialisés et en transition mentionnés dans l'Annexe 1 de la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique. La liste consiste en l'Australie, l'Autriche, la Belgique, la Bulgarie*, le Canada, la Croatie*, la République Tchèque*, le Danemark, l'Estonie*, la Finlande, la France, l'Allemagne, la Grèce, la Hongrie*, l'Islande, l'Italie, le Japon, la Lituanie*, la Lettonie*, le Liechtenstein, le Luxembourg, Monaco, les Pays-Bas, la Nouvelle-Zélande, la Norvège, la Pologne*, le Portugal, la Roumanie, la Fédération de Russie*, la Slovaquie*, la Slovénie*, l'Espagne, la Suède, la Suisse, l'Ukraine*, le Royaume-Uni et les États-Unis d'Amérique, ces derniers ayant ultérieurement déclaré leur intention de ne pas ratifier le Protocole et donc de ne pas adopter de cibles de réduction d'émission. Les cibles d'émission varient selon les pays. L'astérisque dénote les pays en transition vers une économie de marché.
- Annexe B** Les pays de l'Annexe B sont trente-neuf pays qui sont cités dans l'Annexe B du Protocole de Kyoto comme s'étant engagés dans des réductions d'émission. Les émissions légalement contraignantes varient selon les pays. Bien que les termes « Annexe 1 » et « Annexe B » soient souvent utilisés de manière interchangeable, ce sont les pays de l'Annexe 1 qui peuvent en pratique investir dans des projets de mise en œuvre conjointe et de mécanismes de développement propre (les projets éligibles au titre du mécanisme de développement propre sont ceux hors Annexe 1). Ce sont cependant les pays de l'Annexe B qui ont des obligations de réduction d'émission dans le cadre du Protocole de Kyoto.
- La Biélorussie, la Turquie font partie de l'Annexe 1 mais pas de l'Annexe B. La Croatie, le Liechtenstein, Monaco et la Slovénie font partie de l'Annexe B mais pas de l'Annexe 1.

BM	scénario Bonn-Marrakech (Protocole de Kyoto)
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CEI	Communauté des États indépendants
CIRED	Centre international de recherche sur l'environnement et le développement, laboratoire du CNRS
CM	scénario du compromis manqué à La Haye (Protocole de Kyoto)
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CNUCC	Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique
COP	Conférences des Parties (Protocole de Kyoto)
EEE	Économies d'Europe de l'Est
EHSS	École des hautes études en sciences sociales
EV	variation équivalente (surplus compensé des consommateurs utilisé pour fournir un équivalent monétaire des variations de bien-être d'une économie)
GATT	Accord général sur les droits de douanes et les échanges (sigle anglais)
GES	gaz à effet de serre
GIEC	Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
GPW	<i>Global warming power</i> (indice de pouvoir de réchauffement d'un gaz en équivalent CO ₂)
GtC	Gigatonne de carbone
IAE	sigle anglais de AIE
IASA	<i>International Institute for Applied Systems Analysis</i>
IPCC	sigle anglais de GIEC
KW	Kilo Watt
KWc	Kilo Watt calorifique
KWe	Kilo Watt électrique
MDP	mécanisme de développement propre
MIES	Mission interministérielle pour l'effet de serre (France)
MteC	million de tonnes équivalent carbone.
NACC	<i>National assessment of climate change</i> (programme des États-Unis)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique (OECD en anglais)

OMC	Organisation mondiale du commerce
OPEP	Organisation des pays exportateurs de pétrole
PED	pays en développement
PIB	produit intérieur brut
PMA	pays les moins avancés
PNLCC	Programme national de lutte contre le changement climatique (France)
ppm	partie par million en volume (10^{-6})
ppt	partie par billion en volume (10^{-12})
R&D	recherche et développement
t	tonne (10^3 kilogrammes)
TGAP	taxe générale sur les activités polluantes
UNFCC	sigle anglais de CNUCC
W	Watt (unité de puissance)

Symboles chimiques

O₂	oxygène
C	carbone
CFC	chlorofluocarbure
CH₄	méthane
CO₂	dioxyde de carbone ou gaz carbonique
HCFC	hydrochlorofluocarbures
HFC	hydrofluorocarbures
N₂O	protoxyde d'azote (ou acide nitreux ou oxyde nitreux)
NO_x	oxyde d'azote (autre que protoxyde)
SO₂	dioxyde de soufre

Commentaire

Paul Champsaur

Directeur général de l'INSEE

La thèse centrale du rapport paraît bien fondée. Il semble justifié de faire quelque chose dès maintenant compte tenu de l'importance des conséquences potentielles négatives, même si celles-ci sont très incertaines, et de l'irréversibilité des phénomènes d'accumulation des gaz à effet de serre (GES).

Ce qui est envisagé pour commencer aura un coût mais ce coût restera modeste pourvu que l'on s'y prenne correctement. Commencer dès maintenant à l'avantage de lancer un processus d'apprentissage collectif.

Ceci dit on ne fait que gagner un peu de temps si l'on se contente d'étaler l'exploitation des ressources d'énergie fossile sans y substituer durablement d'autres sources d'énergie, y compris l'électricité d'origine nucléaire.

Il paraît donc souhaitable de mieux articuler la politique de limitation des émissions de GES avec les politiques énergétiques. Par exemple, j'ai du mal à comprendre l'écart considérable entre les politiques énergétiques européennes et américaines. L'Europe, et la France en particulier, a jugé bon il y a longtemps déjà et bien avant que l'on se préoccupe de l'effet de serre d'adopter des politiques énergétiques beaucoup plus économes en énergie fossile qu'aux États-Unis. Pourquoi ne serait-il pas dans l'intérêt bien compris des États-Unis d'adopter une politique énergétique un peu plus proche de celles menées en Europe et au Japon ?

Ma principale remarque est modeste, elle concerne le comment faire, c'est-à-dire le choix d'instruments, notamment entre quota et taxation, ainsi

que leur articulation s'il y a lieu. Les accords internationaux ont retenu la logique des quotas assortie de la flexibilité permise par des marchés de services. J'admets les arguments concluant qu'il ne serait ni judicieux ni opportun de remettre en cause cette logique sachant en outre que, comme l'a dit Roger Guesnerie, la première urgence est de réintégrer dans la négociation les États-Unis et les grands pays en voie de développement qui n'ont pris aucun engagement. Cependant ces arguments valent beaucoup moins dès que l'on descend d'un cran, c'est-à-dire au niveau de l'Union européenne et moins encore au niveau national. Je pense, en effet, que la taxation accompagnée d'une harmonisation communautaire constitue une approche beaucoup plus efficace et praticable. Elle a en particulier l'avantage de permettre une meilleure maîtrise des problèmes de compétitivité pour les industries fortes consommatrices d'énergie, problèmes qu'il faut traiter avec soin en particulier dans un marché aussi intégré que le marché européen.

Certains pays européens, en particulier le Royaume-Uni et l'Allemagne, ont apparemment réussi à s'engager dans cette voie. La France n'y est pas parvenue avec l'échec du volet énergie de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP). Cet échec a des raisons sans doute plus profondes que les difficultés juridiques soulevées par le Conseil d'État et le Conseil constitutionnel. En France la réflexion concernant la mise au point de ce type de taxe est restée insuffisante. Il s'agit en effet d'une taxe complexe car elle doit délivrer les incitations marginales adéquates vers les entreprises sans effectuer une redistribution trop importante entre celles-ci selon qu'elles appartiennent à des branches grosses consommatrices d'énergie ou non.

L'administration fiscale ne peut voir d'un bon œil ce type de taxe compliquée et qui rapporte assez peu. Pourtant compte tenu de nos engagements internationaux et européens nous avons certainement intérêt à rouvrir ce dossier en nous inspirant de l'expérience d'autres pays européens.

Commentaire

Alain Lipietz

Directeur de recherche au CNRS

Le remarquable rapport de Roger Guesnerie sur la lutte contre l'effet de serre témoigne des prodigieux progrès du débat depuis la conférence de Rio et l'Accord de New York jetant les bases de la Convention Climat, en 1992.

Tout d'abord, la réalité du problème ne semble plus en cause. Elle était plus que discutée en France en 1992. Ensuite, il faut se féliciter que les limites de la rationalité économique soient reconnues, à partir d'une évaluation pertinente du « double dividende ». Le premier dividende attendu, c'est d'éviter les coûts humains et géopolitiques de la dérive de l'effet de serre, que ce soit par des instruments réglementaires (les normes) ou économiques (impôts ou quotas négociables). Le second dividende n'est au plus qu'un effet d'aubaine. Le rapport souligne par ailleurs, et à juste titre, qu'un volet « adaptation » est désormais indispensable à côté du volet prévention, puisque le changement climatique est irréversiblement engagé. Enfin, le rapport souligne que le Protocole de Kyoto constitue le seul cadre existant pour agir. Ceux qui se plaignent d'immobilisme oublient l'importance des enjeux de la politique mondiale de prévention des changements climatiques décidée à Kyoto (et plutôt rapidement, en fait).

Les atouts du système de quotas négociables, décidé à Kyoto, par rapport à la norme ou à l'impôt, sont clairement mis en lumière par le rapport. Il rejoint sur ce point la proposition de l'Indien Anil Agarwal dans un célèbre rapport du Centre for Science and Environment, avant même la Conférence

de Rio⁽¹⁾. Anil Agarwal proposait de répartir en quotas, y compris au tiers-monde, la quantité de gaz à effet de serre recyclable par l'écosystème planétaire, soit 500 kilos d'équivalent carbone (dans le CO₂) par personne et par an, sur la base de 10 milliards d'êtres humains. En accordant aux pays dont le volume d'émissions est inférieur à cette quantité, la possibilité de vendre leurs quotas inutilisés, on les encouragerait, avant même qu'ils aient atteint le maximum par tête, à faire des efforts pour maintenir leur production de gaz à effet de serre au plus bas niveau compatible avec leur croissance. En fait, l'Accord de New York avait rejeté la proposition d'Anil Agarwal en ciblant les objectifs de réduction des émissions uniquement sur les pays développés, dits de l'Annexe 1 (aujourd'hui Annexe B, la liste de pays étant légèrement différente comme expliqué dans le glossaire de ce rapport), mais en avait conservé l'esprit puisqu'il n'exigeait rien du tiers-monde et lui ouvrait la possibilité de mise en œuvre conjointe (MOC) de ses projets avec des pays développés (ce qui équivaut à des échanges de quotas en nature). De même, avec le Protocole de Kyoto, la Russie a tout intérêt, quand son économie repartira, à croître le plus « proprement » possible pour exporter des quotas.

Autre point positif, le rapport se prononce (comme Anil Agarwal) pour le dépérissement à long terme des « droits acquis » et la nécessaire convergence universelle des quotas par tête, reconnaissant l'égalité de tous les êtres humains devant le patrimoine atmosphérique, quelles que soient leur génération ou leur nationalité.

Enfin, Roger Guesnerie recommande avec raison d'inclure les exigences de Kyoto dans les négociations de l'Organisation mondiale du commerce. Et en effet, tous les produits ne peuvent plus être traités indifféremment selon que leurs procédés de production ont des effets ou non sur le climat. Le principe, vieux comme le GATT, du « produit intérieur » (une tonne d'acier, importée ou non, est une tonne d'acier) doit être remplacé par le principe du « produit et procédé de production » (si on produit de l'acier sans effet de serre, on doit pouvoir se protéger d'un acier importé produit en contravention de l'Accord de Kyoto).

S'il faut émettre des critiques, on pourrait d'abord peut-être souligner, mieux que ne le fait le rapport, que les changements climatiques ne menacent sans doute pas la survie de l'humanité à court terme, mais ont des effets immédiats, d'ores et déjà constatés, comme le coût des tempêtes, et des effets à vingt ans, comme la baisse de rentabilité des investissements dans les stations de sports d'hiver, ou le refus du secteur privé de la réassurance d'assumer le risque climatique.

Ensuite, il faut s'opposer avec fermeté (et l'auteur en a tenu compte dans les rédactions successives de son rapport) à tout vocabulaire « écono-

(1) Agarwal A. et S. Narain (1991) : *Global Warming in an Unequal World*, Centre for Science and Environment, New Delhi.

miste » qui semblerait se référer à un principe « pollué-payeur ». Certes, Coase a fait remarquer que le principe « pollueur-payeur » n'allait pas de soi : tout dépend d'une convention sur l'allocation des droits de propriété. Seulement, l'Humanité (dans le cadre des conférences de l'Organisation des Nations unies), et en particulier notre pays (dans le cadre de l'Organisation de coopération et de développement économique), a tranché pour le principe « pollueur-payeur » ! Il faut donc proscrire des expressions telles que : « le consentement à payer de la part du pollué », « la perte de surplus de la part du pollueur », « l'altruisme vis-à-vis des réfugiés du climat », le « *grandfathering* » ou les « droits acquis », qui suggèrent que ceux qui polluent ont le droit pour eux, et que les pollués doivent savoir s'ils sont prêts à payer pour ne pas l'être. Prenons le cas du Bangladesh, qui perdrait un tiers de son territoire si la mer montait de 60 centimètres : le principe « pollueur-payeur » n'est pas discutable, et les pays qui produisent plus de 500 kilos par personne et par an de gaz à effet de serre seraient évidemment responsables d'une telle catastrophe.

Toute remise en cause (y compris dans le vocabulaire choisi et dans la prise en compte des « droits acquis à polluer ») de ce principe maintes fois discuté et accepté par la communauté humaine témoigne de ce que le raisonnement économique de Roger Guesnerie repose non pas sur le droit, mais sur le rapport de force. Ce qui implique des négociations, y compris avec la Chine, l'Inde et les pays de l'OPEP, à peine évoquées, et pas seulement avec les États-Unis.

Sur la question des quotas, le rapport conduit une réflexion tout à fait intéressante, comme il a déjà été dit, mais ne prend sans doute pas suffisamment en compte les critiques qui leur sont couramment faites, sur l'« air chaud » notamment. Par « air chaud », on désigne dans le jargon des organisations non gouvernementales les quotas illégitimement attribués, ou les objectifs de réduction illégitimement amoindris, ou encore les émissions tout simplement ignorées. On ne peut évidemment pas traiter de la même manière les pays qui ont réellement des réserves de quotas disponibles par rapport à la quantité maximum autorisée, et ceux qui, l'ayant largement dépassée, se voient accorder des quotas supplémentaires injustifiés.

Deuxième problème : dès lors que les quotas sont « négociables », qui paierait vraiment ? Certes, il n'est décemment pas possible de faire payer l'Inde, mais pour une raison qui mérite d'être clairement explicitée : la dotation initiale de capacité à payer est loin d'être la même pour tous les pays. Le coût d'abattement marginal (en faveur des générations futures) n'a pas le même poids selon le niveau de vie de la génération présente. En outre, s'il est réglé en dollars, l'achat de quota représenterait tout au plus pour les États-Unis l'exercice de leur droit de seigneurage.

Quant à la position française et européenne, elle procède d'un empilement invraisemblable. Au lieu de fixer une contrainte sur les quantités, affaiblie par la possibilité de négocier les quotas, elle-même assortie d'un pourcentage sur la quantité physique des quotas négociables, il aurait été plus

simple d'établir, comme pour les marchés agricoles, un prix plancher, afin de rémunérer avantageusement les efforts du vendeur, et un prix plafond, jouant le rôle d'un impôt, la fameuse taxe universelle sur les émissions de gaz à effet de serre que prônait également Anil Agarwal.

Le rapport n'approfondit pas non plus suffisamment certains problèmes économiques. Donner gratuitement des quotas à des entreprises en activité conduirait à une formidable distorsion de concurrence. La seule solution équitable et efficiente est sans aucun doute de mettre ces quotas aux enchères, quitte à soutenir financièrement et « horizontalement » l'industrie dans ses économies d'énergie. Tenant compte de cette objection, l'Union européenne vient d'ailleurs de décider qu'une partie des quotas de son marché expérimental serait mise aux enchères.

Autre observation : pour combattre l'argument américain, de mauvaise foi, selon lequel le tiers-monde produira à l'avenir davantage de gaz à effet de serre que les pays développés, la meilleure solution est d'adopter une position universaliste et de fixer un niveau « normal » d'émission par tête. Dès lors, si l'on admet un objectif universel de 5 ou 600 kg de carbone par tête à l'horizon 2040, on pourrait justifier que « déjà » les pays développés ont des efforts à faire mais « pas encore » les autres, tout en convenant que tout pays dépassant le seuil de 800 kg (par exemple) se trouverait automatiquement impliqué par les contraintes de Kyoto⁽²⁾.

Enfin, avec l'OPEP, une négociation fiscale paraît inévitable. On ne peut pas à la fois affirmer que l'augmentation du prix des hydrocarbures payé par le consommateur occidental aboutira à une diminution des quantités vendues par l'OPEP, à prix d'exportation constant, et penser que celle-ci acceptera de rentrer dans la négociation. Il faut donc, au contraire, l'assurer que cette augmentation fera l'objet d'un partage équitable, préalablement établi, entre la fiscalité des pays importateurs et la rente des pays exportateurs.

D'une façon générale, on peut se demander si la négociation géostratégique, entre l'OPEP, l'Union européenne, les pays « pollueurs » de l'Ombrella (États-Unis, Canada, Australie), le tiers-monde en développement rapide (Chine et Inde) et les pays moins avancés (PMA) menacés par l'effet de serre, peut trouver une solution dans le seul cadre de la négociation climat. En ne faisant aucune concession à La Haye aux demandes du groupe des pays « méga-divers » dans la négociation sur la propriété de la biodiversité, en persistant à Doha sur les subventions aux exportations agricoles, l'Union européenne, et la France en particulier, s'est aliénée de nombreux alliés potentiels dans la « guerre du climat ».

(2) Voir le texte « Œuvrer pour la viabilité écologique mondiale. Pour une nouvelle grande transformation », présenté à la Conférence de l'OCDE '21st Century Economic Dynamism: Anatomy of a Long Boom', Francfort, 2-3 décembre.
Disponible sur http://www.lipietz.net/article.php?id_article=300

Complément A

Certitudes et incertitudes du changement climatique

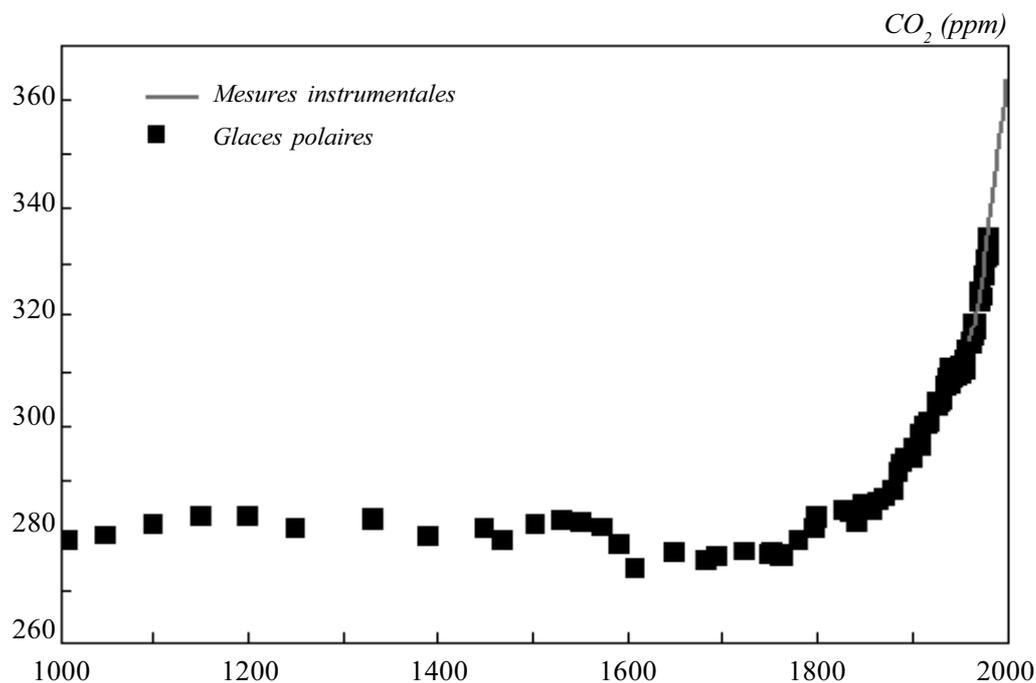
**Philippe Jean-Baptiste, Philippe Ciais,
Jean-Claude Duplessy et Jean Jouzel**

*Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement,
Unité mixte de recherche CNRS-CEA 1572*

À l'heure actuelle, environ 85 % de la production d'énergie primaire mondiale (IEA, 2001) reposent sur la combustion de carbone fossile (charbon, pétrole ou gaz). Cette consommation énergétique s'accompagne de rejets massifs de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère, lesquels dépassent actuellement les six milliards de tonnes de carbone par an (GIEC, 2001a). Depuis le début de l'ère industrielle, ces émissions ont provoqué une augmentation sans précédent de la concentration en CO₂ dans l'air (graphique 1). Les molécules de CO₂ ayant la propriété de bloquer le rayonnement infrarouge terrestre réémis vers l'espace, l'accumulation de ce gaz dans notre atmosphère, par l'échauffement qu'il génère dans les basses couches de l'atmosphère, constitue désormais une menace pour l'équilibre climatique planétaire.

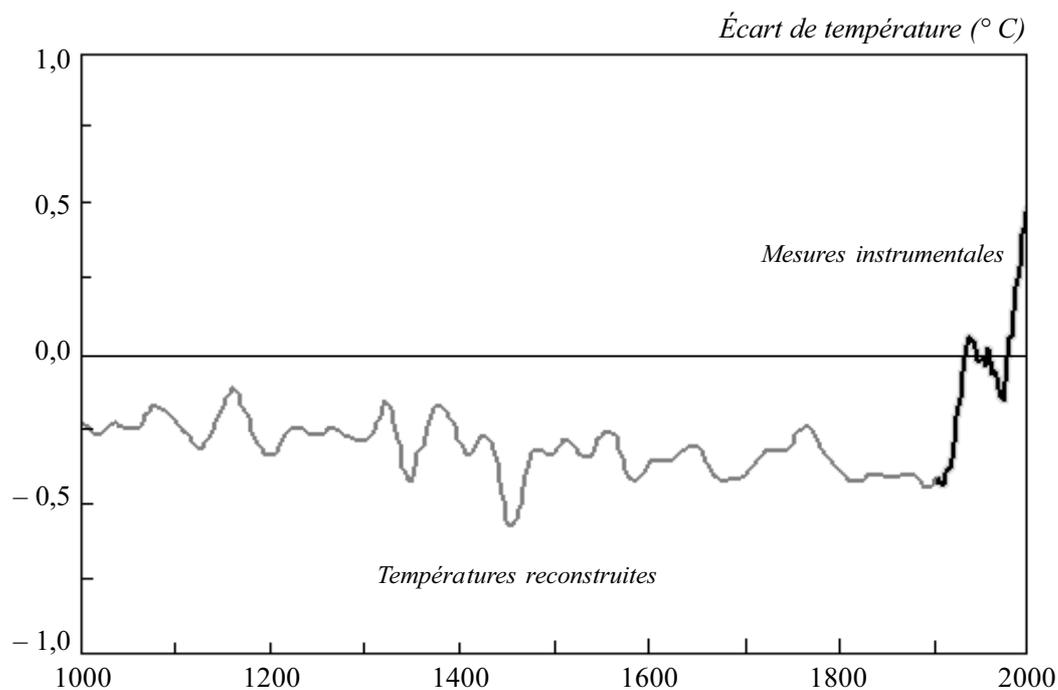
Bien que connu depuis plus d'un siècle (Arrhenius, 1896), ce phénomène d'effet de serre lié à la combustion des énergies fossiles n'est entré dans le champ des préoccupations des gouvernements et des opinions publiques que depuis une dizaine d'années seulement, depuis que les scientifiques ont été capables de mettre en évidence les premiers effets tangibles de ce réchauffement.

1. Évolution de la teneur atmosphérique en CO₂ au cours du dernier millénaire



Sources : Etheridge et al., 1996 et Keeling et Whorf, 1998.

2. Évolution de la température moyenne de l'hémisphère nord au cours du dernier millénaire



Source : GIEC, 2001a.

1. Les certitudes

La progression des connaissances, tant expérimentales que théoriques, sur le fonctionnement du système climatique, autorise le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à affirmer dans son 3^e rapport de synthèse sur le changement climatique (GIEC, 2001a), que le climat de la Terre se réchauffe et que ce phénomène, qui excède clairement la variabilité naturelle, est attribuable à l'activité humaine.

Les principales conclusions de la communauté scientifique internationale concernant le réchauffement climatique sont actuellement les suivantes :

- en moyenne globale, la température au niveau du sol a augmenté de $0,6 \pm 0,2^\circ \text{C}$ au cours du XX^e siècle. Cette augmentation s'est effectuée en deux phases, de 1910 à 1945, puis de 1976 à nos jours. Sur la période récente, les minima nocturnes ont augmenté en moyenne de $0,2^\circ \text{C}$ par décennie et les maxima diurnes de $0,1^\circ \text{C}$ par décennie. Le réchauffement moyen, de $0,15 \pm 0,05^\circ \text{C}$ par décennie au niveau du sol, concerne l'ensemble de la basse atmosphère ($< 8 \text{ km}$) dont la température moyenne augmente de $0,05^\circ \text{C}$ par décennie. Les données océanographiques de la seconde moitié du XX^e siècle montrent également un réchauffement de l'océan superficiel (couche 0-300 m) de $0,31^\circ \text{C}$ sur l'ensemble de cette période (Levitus et al., 2000) ;

- l'analyse des indicateurs utilisés pour les reconstitutions paléoclimatiques et les données instrumentales montrent que le XX^e siècle a été, selon toute probabilité, le siècle le plus chaud du millénaire, la décennie quatre-vingt-dix étant elle-même la plus chaude du siècle (graphique 2) ;

- au cours du siècle passé, les glaciers d'altitude ont connu un retrait généralisé. Les observations en provenance des satellites, disponibles depuis la fin des années soixante, indiquent également une réduction de 10 % des surfaces enneigées. Parallèlement, la période de gel hivernal des lacs et rivières a diminué d'environ deux semaines sur l'ensemble du siècle ;

- le niveau des mers s'est élevé de 0,1 à 0,2 mètre au cours du XX^e siècle. Cette augmentation est due à l'effet cumulé de la fonte des glaciers et de la dilatation thermique des couches océaniques superficielles. Le réchauffement des couches superficielles de l'océan se traduit également par une décroissance de la surface de la banquise Arctique. Celle-ci a diminué de 10 à 15 % depuis 1950 tandis que son épaisseur en fin de la période estivale a chuté de 40 % ;

- l'augmentation des températures a une incidence observable sur le cycle hydrologique et le régime des pluies. Ainsi, depuis 1900, les précipitations ont augmenté de 0,5 à 1 % par décennie dans les moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord, avec une augmentation globale de 2 % de la couverture nuageuse. Dans la plupart des régions, il y a une bonne corrélation entre cette augmentation de la couverture nuageuse et la diminution de l'amplitude du contraste thermique journalier.

Principal gaz à effet de serre, le gaz carbonique n'est cependant pas le seul en cause. Depuis 1750, les concentrations atmosphériques en oxyde

nitreux (N_2O) et méthane (CH_4) ont augmenté de 17 et 151 % respectivement. Les chlorofluorocarbures (CFC) et leurs substituts dans le cadre du protocole de Montréal (hydrofluorocarbones – HFC –, perfluorocarbones – PFC) participent également au forçage radiatif, de même que l’ozone troposphérique dont la teneur, à la différence de l’ozone stratosphérique, est en augmentation. À l’opposé, la plupart des aérosols à l’exception des suies (*black carbon*) ont un effet de refroidissement, par réflexion et diffusion de la lumière solaire incidente (effet direct) et par leur influence sur la formation et la réflectance des nuages (effet indirect).

Le réalisme des simulations climatiques a progressé de manière notable grâce à de grandes campagnes de mesure qui ont conduit à une meilleure description des processus physiques dans l’atmosphère (cycle de l’eau, aérosols...), au niveau des surfaces continentales et dans l’océan (dynamique océanique, interaction océan/glace de mer...). Ces progrès doivent également beaucoup à l’augmentation de la puissance des calculateurs, qui autorise une meilleure résolution spatiale et le couplage des différents sous-ensembles du système climatique. Cette amélioration de la physique, et l’utilisation de modèles couplés capables de prendre en compte les rétroactions entre les différents compartiments du système, permettent de simuler de manière relativement satisfaisante l’évolution des températures observée depuis le début de l’ère industrielle. Ces simulations indiquent que ni les modes internes de variabilité du système climatique ni les forçages naturels liés aux variations de la constante solaire et aux éruptions volcaniques ne peuvent expliquer seuls l’évolution observée des températures. La prise en compte de l’effet de serre lié aux rejets anthropiques est nécessaire pour obtenir un accord satisfaisant entre simulations et données.

2. Le rôle central du cycle du carbone

Le gaz carbonique est le principal gaz à effet de serre rejeté par l’activité humaine. C’est également l’un de ceux dont le temps de résidence dans l’atmosphère est le plus long. À la différence des autres gaz également en cause (CH_4 , N_2O , CFC, HFC) dont les sources anthropiques sont liées à des activités spécifiques (industrielles ou agricoles) pour lesquelles certaines actions correctives sont envisageables dans des délais relativement courts, les émissions de CO_2 sont largement liées à la production d’énergie. Les actions correctives sont donc beaucoup plus difficiles à mettre en place quand on sait que :

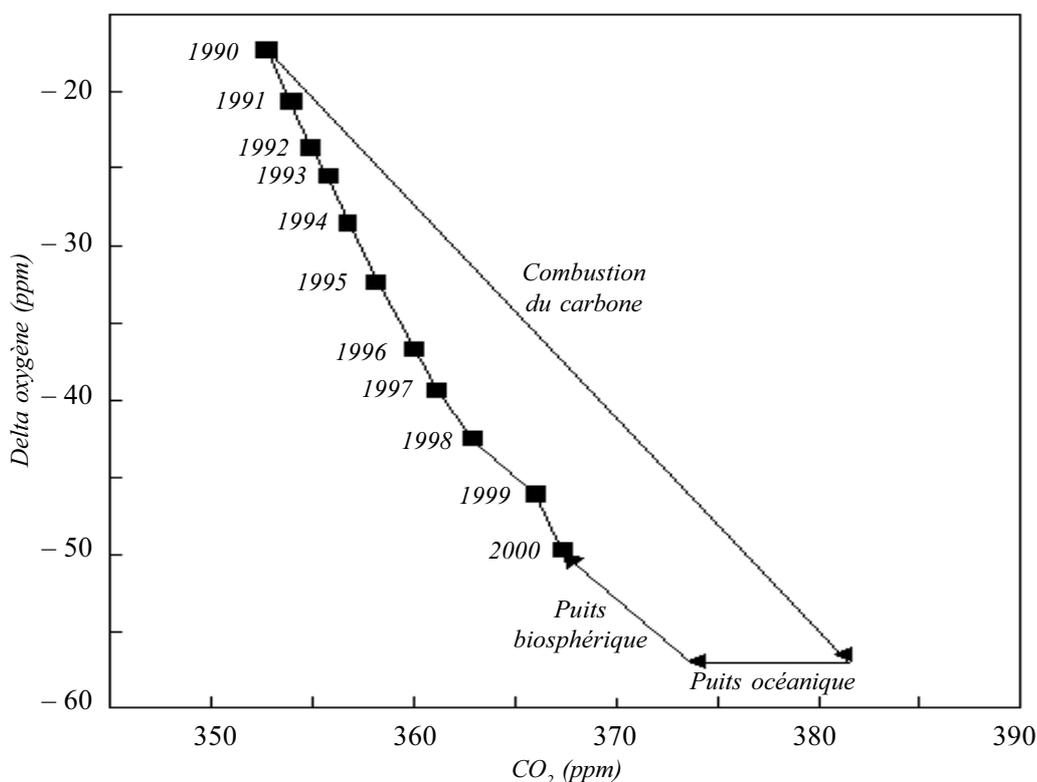
- les besoins énergétiques mondiaux augmentent continuellement, tirés par la croissance, la démographie et l’essor économique du tiers-monde ;
- 85 % de ces besoins sont actuellement assurés par du combustible fossile (charbon, gaz, pétrole) générateur de CO_2 ;
- les prévisions de rejets de CO_2 , si rien n’est fait pour les limiter, atteindront les 15 milliards de tonnes de carbone par an en 2050, soit un doublement par rapport à aujourd’hui (scénario IS92a « *Business As Usual* » du GIEC) ;

- une stabilisation de la teneur atmosphérique en CO₂ autour de 550 parties par million (ppm) (objectif considéré comme acceptable par les scientifiques) nécessitera au contraire une diminution des rejets environ d'un facteur 2 par rapport au niveau actuel.

La comparaison du volume cumulé des émissions de CO₂ et de l'augmentation de sa teneur dans l'air montre que seule la moitié environ du gaz émis s'accumule dans notre atmosphère. L'étude du cycle du carbone nous indique que l'autre moitié est absorbée, à parts sensiblement égales, par la végétation continentale et l'océan (graphique 3).

Comment va évoluer la capacité d'absorption de ces réservoirs naturels dans l'avenir ? La nature va-t-elle continuer indéfiniment à nous aider en absorbant toujours plus de CO₂ ? Pour répondre à ces questions essentielles sur le fonctionnement des sources et puits de carbone, il est indispensable d'acquérir une connaissance approfondie des mécanismes physiques, chimiques et biologiques régissant l'évolution du cycle du carbone dans le contexte d'un changement climatique.

3. Évolution comparée de la teneur en oxygène de l'air et de la teneur atmosphérique en CO₂



Note : L'écart observé à la relation stoechiométrique liant CO₂ et O₂ dans la réaction de combustion permet de mettre en évidence la part respective des puits océaniques et continentaux dans l'absorption des émissions de CO₂ anthropique.

Source : GIEC, 2001a.

2.1. Cycle naturel et cycle perturbé du carbone

Les principaux réservoirs naturels capables d'échanger du carbone sur des échelles de temps courtes sont l'atmosphère, l'océan et la biomasse continentale (tableau 1). Les autres grands réservoirs (sédiments marins, roches) n'échangent de manière appréciable avec les précédents que sur des échelles de temps géologiques. Sur les continents, la croissance de la végétation consomme du CO₂ atmosphérique via la photosynthèse. Le carbone ainsi fixé par les plantes retourne à l'atmosphère par décomposition de la matière organique (respiration) et par des phénomènes plus brutaux comme les incendies (feux de forêt, feux de biomasse...). Dans l'océan, outre la biomasse marine, qui forme un réservoir de taille modeste et suit les mêmes cycles naturels que la biomasse continentale, la quasi-totalité du carbone se trouve sous la forme inorganique d'ions carbonates et bicarbonates (la quantité sous forme de CO₂ moléculaire dissous ne représente guère que 1 % du total). L'océan tend à s'équilibrer en permanence avec l'atmosphère à l'interface eau-air, le flux local étant dirigé de l'océan vers l'atmosphère ou inversement selon la différence entre la concentration en CO₂ dissous et la concentration correspondant à l'équilibre de solubilité avec l'atmosphère. Dans le cycle océanique du carbone, ce dernier est soustrait à l'atmosphère principalement :

- dans les régions actives de plongée des eaux océaniques de surface. Dans ces zones, principalement situées dans les hautes latitudes, les eaux denses et froides sont capables de dissoudre un maximum de CO₂, lequel est ensuite entraîné vers le fond par la plongée des masses d'eau ;
- par la production de biomasse marine dont la dégradation entraîne du carbone vers les fonds océaniques. Ce carbone se retrouve dans les profondeurs, où il est en majorité reminéralisé. À peine 1 % du flux de carbone d'origine biologique sédimente et est ainsi soustrait durablement à l'océan.

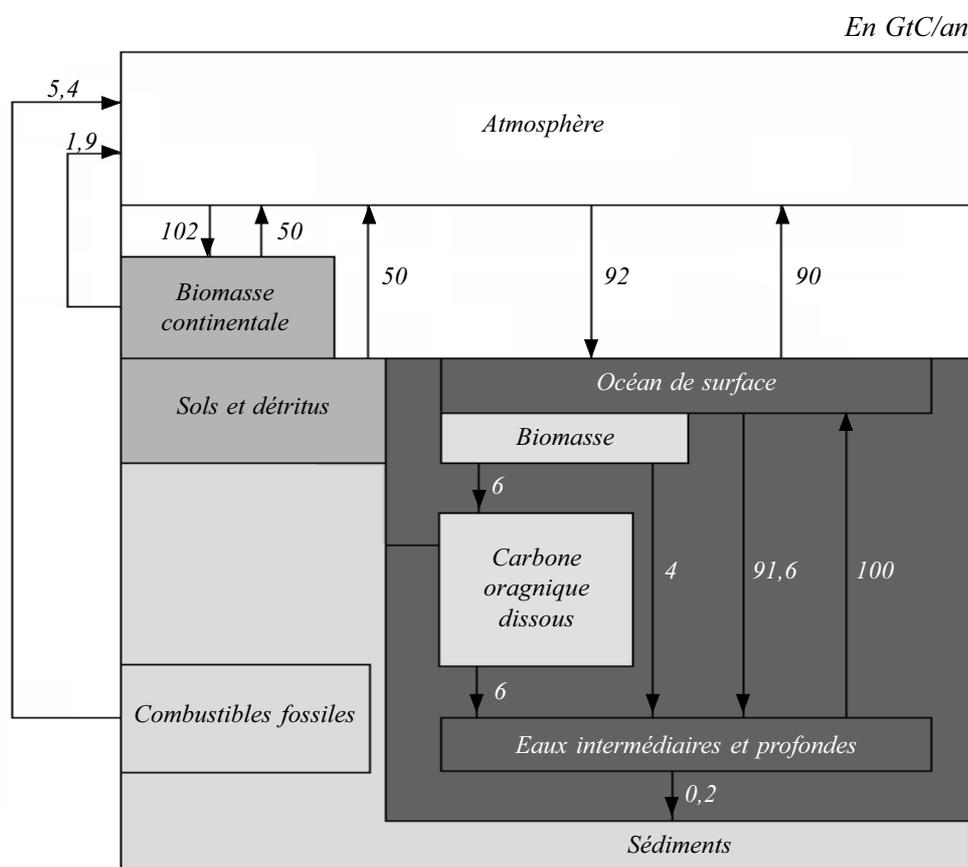
1. Principaux réservoirs terrestres de carbone échangeable : bilan préindustriel et pour la décennie 1990-2000

	Stocks de carbone (GtC)	
	Période préindustrielle	Période 1990-2000
Océan, dont :	39 700	39 820
• Océan superficiel	1 000	1 020
• Océan intermédiaire et profond	38 000	38 100
• Biomasse marine	3	3
• Carbone organique dissous	700	700
Continents, dont :	2 510	2 480
• Végétation	490	470
• Sols et détritiques organiques	2 020	2 010
Atmosphère	580	760

Sources : Siegenthaler et Sarmiento, 1993 et GIEC, 2000b et 2001.

Ces deux phénomènes expliquent que les eaux profondes soient plus riches en carbone que les eaux de surface, et donc sursaturées en CO_2 par rapport à l'atmosphère. Dans un système océan-atmosphère naturel à l'équilibre (avant la perturbation anthropique), le flux de carbone de l'atmosphère vers l'océan est compensé principalement par un flux de CO_2 de l'océan vers l'atmosphère dans les zones de remontée d'eaux profondes (zones d'*upwelling*), où ces eaux riches en CO_2 dégazent en arrivant en surface.

4. Flux de carbone échangés entre les principaux réservoirs pour la décennie 1980-1989



Source : Siegenthaler et Sarmiento, 1993.

Depuis le début de l'ère industrielle, l'équilibre naturel du cycle du carbone a été rompu par l'injection de CO_2 supplémentaire produit par la combustion des énergies fossiles et la déforestation. Le CO_2 en excès dans l'air crée un déséquilibre entre l'atmosphère et les réservoirs continentaux et océaniques. Cet excès va tendre à se résorber naturellement en se répartissant entre ces réservoirs, qui constituent donc transitoirement des puits de carbone (graphique 4). Une connaissance approfondie des sources et puits

de carbone est importante non seulement d'un point de vue comptable, dans le cadre des négociations internationales sur la limitation des gaz à effet de serre, mais également pour la connaissance scientifique du cycle du carbone et la prévision de son évolution future. La quantification des sources et puits de carbone à l'échelle mondiale s'appuie sur deux approches complémentaires :

- l'agrégation des flux locaux en provenance des différents types de systèmes naturels (approche « montante »). Cette approche fait appel à la fois à des mesures locales et à la modélisation des processus physiques et bio-géochimiques qui conditionnent le cycle continental et océanique du carbone ;
- l'inversion du champ des concentrations atmosphériques, mesuré par les différents réseaux de mesure (approche « descendante »).

Cette quantification est compliquée par la variabilité interannuelle des sources et puits de CO₂, due à l'impact de la variabilité du climat sur les processus bio-géochimiques (Bousquet et *al.*, 2000).

2. Bilan global du carbone

	<i>Flux en GtC/an</i>	
	Décennie quatre-vingt	Décennie quatre-vingt-dix
Émissions fossiles	5,5 ± 0,5	6,3 ± 0,6
Accumulation atmosphérique	- 3,3 ± 0,2	- 3,3 ± 0,2
Puits océanique	- 2,0 ± 0,8	- 2,3 ± 0,8
Flux net continental, dont :	- 0,2 ± 1,0	- 0,7 ± 1,0
• Changements d'utilisation des terres ^(*)	1,7 ± 0,8	1,6 ± 0,8
• Puits continental résiduel	- 1,9 ± 1,3	- 2,3 ± 1,3

Note : (*) Déforestation.

Source : GIEC 2000b.

Depuis le précédent rapport du GIEC publié en 1996, des avancées scientifiques importantes ont été faites dans la compréhension des échanges de CO₂ entre la surface et l'atmosphère, permettant pour une bonne part de réconcilier entre elles les différentes approches décrites ci-dessus. Une littérature abondante a trait à l'étude du cycle naturel et perturbé du carbone. Les principales conclusions de ces recherches, détaillées dans le nouveau rapport du GIEC sont les suivantes :

- l'océan absorbe actuellement environ 2 GtC/an. Ce chiffre est raisonnablement bien contraint par les données océanographiques et confirmé également par les modèles. Compte tenu des émissions de carbone fossiles auxquelles s'ajoutent celles liées à la déforestation, le bilan du carbone implique un puits sur les continents de l'ordre de 2 GtC/an (tableau 2) ;

- il existe maintenant un véritable faisceau d'indices, basé à la fois sur l'analyse des mesures atmosphériques, sur les inventaires de biomasse et sur les simulations des modèles d'écosystèmes, permettant d'affirmer qu'une partie importante de ce puits ($> 0,6$ GtC/an) est localisée en Eurasie et en Amérique du Nord. Une forte incertitude demeure néanmoins sur la répartition de ce puits entre les différents biotopes d'Europe, de Sibérie et d'Amérique du Nord ;

- en parallèle, il est également vraisemblable qu'il existe aussi un puits de carbone continental dans les tropiques. Toutes les inversions du champ de concentration atmosphérique produisent en effet un flux de CO_2 proche de zéro pour les continents tropicaux, ce qui implique qu'une accumulation de carbone compense l'effet de la déforestation. Des études de terrain confirment par ailleurs, au niveau local, l'existence de puits de carbone à ces latitudes.

Les mécanismes physico-chimiques à la base de l'absorption du CO_2 atmosphérique par l'océan reposent sur l'équilibre au sein de l'eau de mer des différentes espèces ioniques de carbone inorganique, carbonates et bicarbonates, et sont donc relativement simples. En revanche, le rôle de l'activité biologique marine, elle-même dépendante de l'apport de nutriments par les eaux de subsurface, est plus incertain. La connaissance des mécanismes responsables des puits de carbone continentaux est également très complexe. De nombreuses études semblent accréditer l'existence, au moins pour certaines espèces végétales, d'un effet de fertilisation provoqué par l'augmentation du CO_2 atmosphérique. Cet effet pourrait expliquer l'existence des puits biosphériques sur les continents. Néanmoins, il est également possible qu'une partie du puits observé, en particulier en Europe et aux États-Unis, ne soit que le reflet d'un changement d'utilisation des terres :

- repousse de certaines forêts défrichées au début du XX^e siècle ;
- fertilisation liée aux dépôts azotés d'origine anthropique, véhiculés par la circulation atmosphérique ;
- changement d'usage de certaines terres agricoles : la conversion des terres vierges en terres agricoles a engendré dans le passé un déstockage du carbone initialement enfoui dans les sols de l'ordre de 30 tC/ha (Lal, 2000). L'inverse, c'est-à-dire par exemple la transformation de terres de labour en prairies, peut contribuer à un restockage d'une partie de ce carbone déstocké initialement lors de leur mise en culture.

Il est important de pouvoir discriminer entre les mécanismes naturels de stockage de carbone dans les écosystèmes et les effets induits par l'action de l'homme. En effet, si les prédictions des modèles qui traitent de « fertilisation » par le CO_2 sont exactes, alors il est probable qu'un puits biosphérique continue à exister pendant plusieurs décennies. En revanche, si le stockage actuel est la résultante, quelque peu fortuite, d'un changement d'utilisation des sols, on ne peut miser sur sa longue durée de vie.

2.2. Évolution future des puits de carbone

L'efficacité d'absorption du CO₂ par les systèmes naturels n'est pas constante dans le temps. Elle est fonction des conditions climatiques. L'évolution future des puits de carbone est donc dépendante de la rétroaction entre le changement climatique et le cycle du carbone.

Sur les longues échelles de temps, la forte corrélation entre la teneur atmosphérique en CO₂ et la température enregistrée dans les glaces de l'Antarctique sur les derniers 400 000 ans (forage de Vostok) indiquent que les puits de carbone évoluent en sens inverse de la température moyenne du globe. C'est une mauvaise nouvelle car ceci suggère pour l'avenir un affaiblissement de la capacité d'absorption naturelle du CO₂ au fur et à mesure du réchauffement climatique. Cependant, les choses ne sont pas si simples. Les mécanismes potentiellement responsables de cette corrélation sont nombreux (Sigman et Boyle, 2000) et aucune explication entièrement satisfaisante n'a pu être avancée pour le moment malgré une somme de travaux considérable consacrée à ce sujet. Faute d'une bonne compréhension des mécanismes responsables, il est donc difficile d'affirmer avec une certitude absolue que cette corrélation s'applique également au cas du réchauffement climatique actuel.

Sur les échelles de temps courtes, l'observation de la variabilité interannuelle du taux d'accroissement du CO₂ atmosphérique en liaison avec les variations climatiques (changement du régime des précipitations et de la circulation océanique équatoriale dus au phénomène El Niño, perturbation négative de la température globale provoquée par l'éruption du volcan Pinatubo sur la période 1992-1995...) est extrêmement utile pour tester le réalisme des modèles du cycle du carbone.

La modélisation de l'évolution future des flux de carbone entre les principaux réservoirs indique un affaiblissement progressif de l'efficacité des puits de carbone tant océaniques que continentaux.

Dans l'océan, le ralentissement de l'absorption du CO₂ est lié à deux aspects principaux :

- la stratification progressive des eaux de surface : en se réchauffant, les eaux superficielles deviennent moins denses et ont donc tendance à « flotter » en surface. Ce phénomène s'oppose aux processus de mélange entre les couches superficielles et les couches plus profondes et diminue la remontée des nutriments nécessaires à la croissance du plancton et à l'export de carbone vers les couches océaniques profondes (Friedlingstein et *al.*, 2001) ;
- le ralentissement de la circulation thermohaline : cet affaiblissement de la convection profonde (Stocker et *al.*, 1997) diminue l'efficacité du transfert du CO₂ anthropique vers les grandes profondeurs.

Sur les continents, l'évolution du stock de carbone présent dans la biomasse et les sols dépend de nombreux facteurs tels que la disponibilité en eau, l'effet de « fertilisation » du CO₂ et l'évolution du cycle des nutriments. Les évolutions sont contrastées selon les régions considérées. À niveau global, les modèles prédisent un affaiblissement des puits de carbone, lié

principalement à l'effet accélérateur du réchauffement climatique sur la dégradation bactérienne de la matière organique des sols. Néanmoins, les mécanismes intimes du cycle du carbone dans les sols restent encore mal connus et les résultats des modèles diffèrent largement sur l'ampleur du phénomène.

Enfin, il est également utile de rappeler une évidence, à savoir que la diminution du déséquilibre en CO₂ entre l'atmosphère et les réservoirs de carbone terrestre et océanique, dans l'hypothèse d'un effort de stabilisation de la teneur en CO₂ atmosphérique par une limitation efficace des rejets, conduit « mécaniquement » à un affaiblissement progressif des puits de carbone, jusqu'à leur annulation à terme quand le système aura retrouvé un état d'équilibre.

Sur les 400 gigatonnes de carbone anthropique émis depuis deux siècles, 45 % seulement sont restés dans l'atmosphère. La nature nous a donc amplement aidés jusqu'à présent. Dans l'avenir, l'évolution prévisible du cycle du carbone montre que cette aide a toutes les chances d'être de moins en moins efficace, et que l'humanité n'aura d'autre choix que de compter sur ses propres forces pour stabiliser le niveau atmosphérique des gaz à effet de serre.

3. Concentration et durée de vie des principaux gaz à effet de serre réactifs

Composé	Formule	Concentration (ppt ^(*))		Durée de vie
		Préindustrielle	1998	
Méthane	CH ₄	700	1 745	8-12 ans
Oxyde nitreux	N ₂ O	270	314	110-120 ans
CFC-11	CFCl ₃	0	268	45 ans
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	0	533	100 ans
Hexafluorure de soufre	SF ₆	0	4,2	3 200 ans
HFC-23	CHF ₃	0	14	260 ans
HFC-134a	CF ₃ CH ₂ F	0	7,5	14 ans
HCFC-22	CHF ₂ Cl	0	132	12 ans
Tétrachlorure de carbone	CCl ₄	0	102	35 ans

Note : (*) Partie par billion.

Source : GIEC, 2001a.

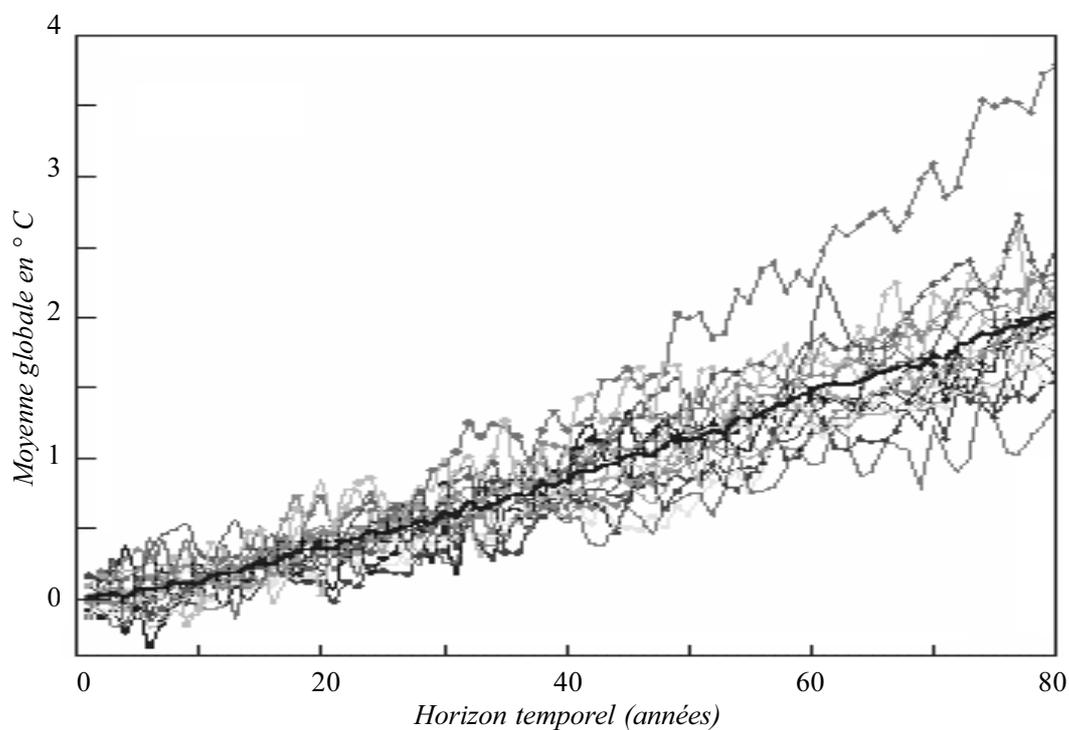
4. Temps caractéristique de mise à l'équilibre des grands compartiments climatiques

Atmosphère	1-2 ans
Biosphère continentale	10-50 ans
Carbone des sols	50-250 ans
Océan superficiel (< 500 m)	5-50 ans
Océan profond	1 000-2 000 ans

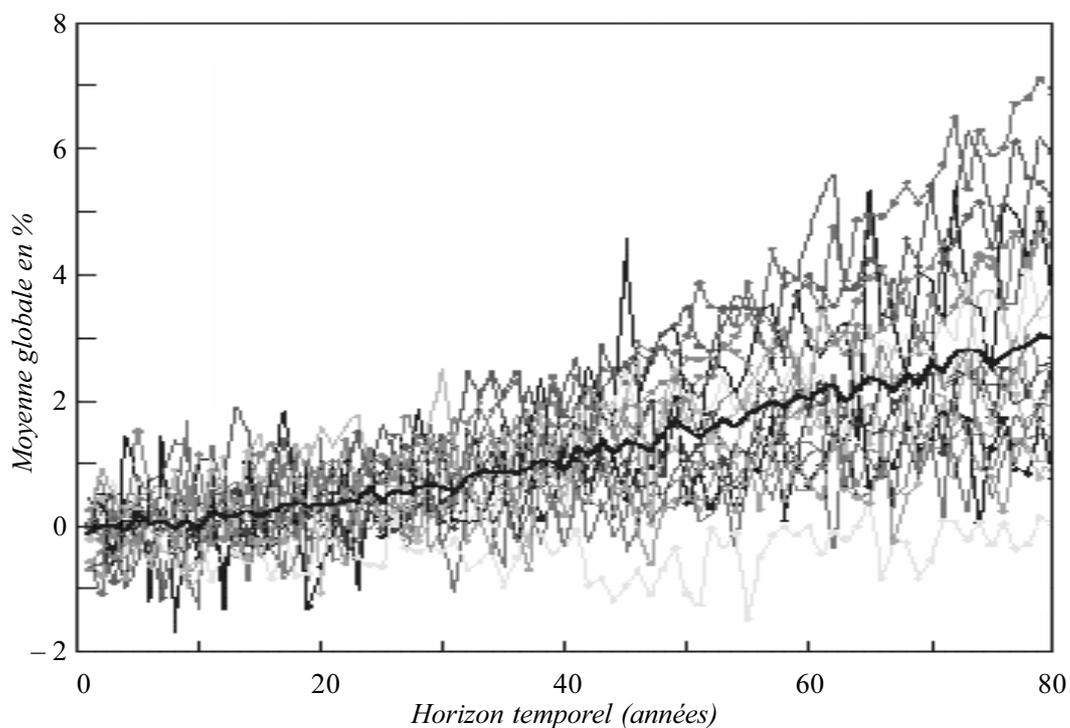
Source : CNRS-CEA.

5. Résultats du scénario « 1 % d'augmentation du CO₂ / an »(*)

a. Évolution des températures



b. Évolution des précipitations



Note : (*) Simulé par les différents modèles participant au programme Climate Models Intercomparison Project (CMIP).

Source : GIEC, 2001a.

3. Les incertitudes

En dépit des progrès importants dans la connaissance du climat, les incertitudes restent nombreuses et nécessitent la poursuite de l'effort international de recherche. Les besoins concernent principalement :

- l'amélioration des connaissances, encore fragmentaires, concernant de nombreux phénomènes tels que :
 - l'impact radiatif direct et indirect des différentes familles d'aérosols et leur spéciation ;
 - le comportement de la glace de mer ;
 - la biogéochimie marine et continentale ;
 - le cycle du carbone et des nutriments (azote, phosphore...) ;
- la modélisation des processus de petite échelle, compte tenu de la résolution spatiale des modèles (elle-même contrainte par le temps de calcul) :
 - description de la turbulence océanique à ses différentes échelles caractéristiques et prise en compte de son rôle vis-à-vis de la circulation océanique et du mélange des masses d'eau ;
 - cycle de la vapeur d'eau et modélisation des nuages ;
- l'acquisition de séries temporelles suffisamment longues, permettant d'étudier la variabilité interannuelle à interdécennale du système climatique et l'influence du changement climatique sur ses modes de variabilité (mousson, phénomène El Niño, oscillation nord-Atlantique, fréquence et intensité des événements extrêmes...).

Ces incertitudes se reflètent dans la dispersion des résultats des simulations climatiques effectuées par les meilleurs modèles au niveau international (graphique 5). La dispersion est plus importante pour les précipitations que pour les températures, traduisant les incertitudes sur la modélisation du cycle hydrologique. La dispersion augmente encore quand on passe à des comparaisons sur une base régionale, laquelle constitue pourtant l'échelle pertinente pour les études d'impacts du changement climatique.

3.1. Le climat du futur et la grande incertitude des scénarios d'émission

Les simulations climatiques permettent des projections dans le futur, en fonction des différents scénarios d'évolution envisageables des rejets de gaz à effet de serre (GIEC, 2000a). À ce stade, les imprécisions actuelles de la modélisation du climat semblent relativement bénignes par rapport aux incertitudes concernant l'évolution future des émissions de CO₂. Devant la difficulté de modéliser de manière fiable l'évolution du secteur énergétique sous la contrainte de l'effet de serre, la seule approche opératoire reste celle des scénarios (GIEC, 2000a).

L'hypothèse basse, qui correspond à un succès des politiques de contrôle des émissions de gaz à effet de serre telles que préfigurées par l'Accord

de Kyoto, envisage une diminution importante des émissions de CO₂. Ceci permet à l'horizon 2100 une stabilisation de la teneur en CO₂ à un niveau égal à deux fois la teneur préindustrielle. Pour ce scénario, l'augmentation de la température moyenne globale se situe dans la fourchette 1,4-2,6 ° C.

À l'inverse, l'hypothèse haute correspond à un échec des politiques de contrôle des émissions de gaz à effet de serre et la poursuite de l'utilisation intensive des énergies fossiles allant de pair avec le développement démographique et la croissance économique. Dans ce cas, le réchauffement global simulé pour l'année 2100 par les différents modèles se situe entre 3,2 et 5,8° C.

Dans tous les cas de figures, compte tenu du temps caractéristique de mise à l'équilibre de l'océan profond, le niveau des mers continue de monter pendant des siècles après la stabilisation du CO₂, avec une surcote finale de l'ordre de 0,5 à 2 mètres par rapport au niveau actuel pour un doublement du CO₂ et de l'ordre de 1 à 4 mètres pour un quadruplement (GIEC, 2001a). Cette augmentation quasi-inéluctable du niveau des mers est donc un véritable problème légué aux générations futures.

Tous les scénarios, même les plus optimistes, correspondent à une évolution importante du système climatique. La notion de température moyenne globale cache en réalité une variabilité spatiale importante, avec un réchauffement plus fort des hautes latitudes. La modification de la distribution spatiale des précipitations est également importante, avec semble-t-il une augmentation des pluies aux moyennes et hautes latitudes, principalement en hiver.

En ce qui concerne l'Europe, les projections à 2050-2080 (Acacia Project, 2000) concluent à un réchauffement généralisé, plus ou moins marqué selon les scénarios, avec une augmentation significative des précipitations hivernales sur l'ensemble du continent et une intensification du déficit hydrique en été dans toute l'Europe du Sud.

En général, les modèles prévoient également une augmentation des extrema météorologiques (intensité des épisodes pluvieux, inondations, vagues de chaleur et de sécheresse estivales). Par contre, l'incertitude reste grande sur l'évolution de la fréquence des tempêtes et des cyclones tropicaux, aussi bien dans les données instrumentales disponibles que dans les modèles dont les conclusions divergent sur ce point.

Les scénarios les plus pessimistes impliquent un bouleversement massif du climat, dont l'ordre de grandeur est comparable à une transition glaciaire-interglaciaire telle que celle intervenue il y a 20 000 ans. Dans ce cas de figure, les climatologues n'excluent pas l'apparition de « surprises » climatiques, c'est-à-dire de rétroactions de grande ampleur pouvant conduire à des comportements plus ou moins catastrophiques du système climatique.

3.2. Des incertitudes du troisième type : les « surprises » climatiques

En fonction de l'ampleur du réchauffement à venir, les scientifiques ont identifié un certain nombre de phénomènes physiques susceptibles de se déclencher, et dont l'occurrence représenterait un bouleversement majeur du système climatique. La notion de surprise climatique tient au fait que si ces phénomènes sont bien identifiés, leur probabilité d'apparition est incertaine dans le cadre de nos connaissances actuelles. Parmi les principaux phénomènes à caractère dramatique, on peut citer :

- la déstabilisation de la calotte Antarctique de l'Ouest : même s'il existe un consensus sur le fait qu'aucun risque réel n'existe pour ce siècle, cette déstabilisation est possible à l'échelle de quelques siècles et entraînerait une hausse du niveau des mers de 5-6 mètres ;

- la fonte de la calotte groenlandaise : l'évolution du Groenland dépend fortement de l'ampleur du réchauffement global, avec une compétition incertaine entre les deux phénomènes antagonistes que constituent l'augmentation prévisible des précipitations neigeuses d'une part, et l'accélération de l'abrasion du glacier d'autre part, liée à la hausse des températures. Des modèles glaciologiques suggèrent qu'un réchauffement de 5,5° C maintenu pendant un millénaire provoquerait la fonte de la moitié de la calotte, avec une montée du niveau marin de trois mètres. À plus long terme, il est possible que l'on assiste à la disparition totale de la glace du Groenland, correspondant à une élévation des océans de six mètres ;

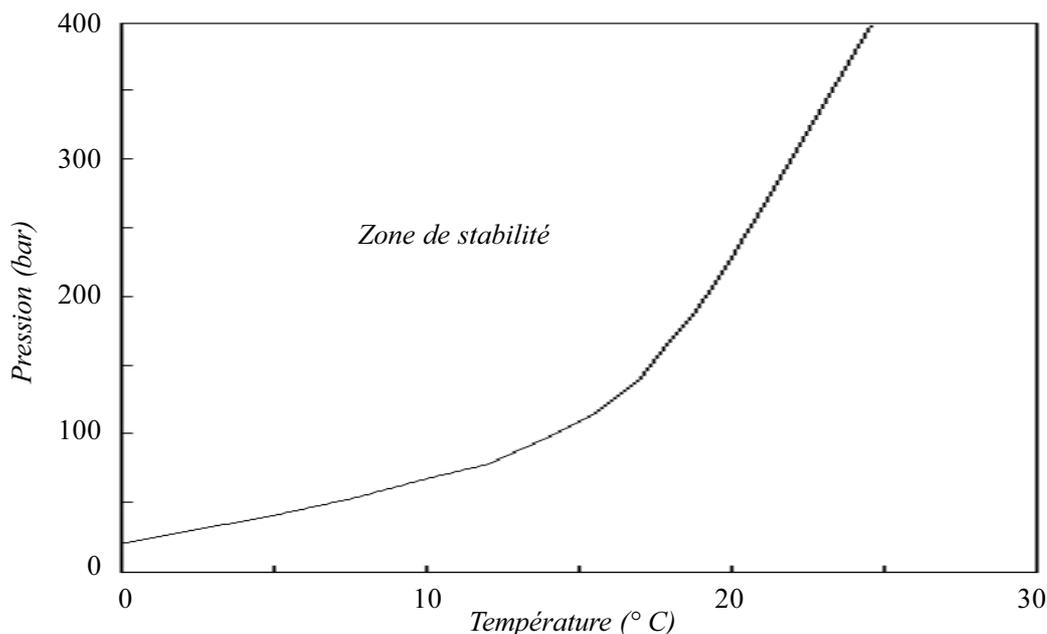
- l'arrêt de la circulation océanique thermohaline : la circulation générale de l'océan profond possède deux modes principaux, caractérisés par la présence ou l'absence de la grande boucle de circulation convective qui prend sa source dans l'Atlantique Nord. Les paléocéanographes ont apporté la preuve expérimentale de l'existence de ces deux modes de fonctionnement dans le passé (Duplessy et *al.*, 1988 et Broecker, 1997). La plupart des modèles indiquent un affaiblissement progressif de cette boucle de circulation thermohaline avec le réchauffement climatique, pouvant aller jusqu'à son arrêt total. L'étude de Stocker et *al.* (1997) montre en outre que la perturbation de la circulation thermohaline est fonction du rythme d'augmentation du CO₂ et que l'impact est d'autant plus fort que le rythme d'émission est élevé. Vu le rôle majeur joué par l'océan dans le système climatique, ce phénomène aurait des conséquences de grande ampleur sur le climat mondial. Ceci est particulièrement vrai pour l'Europe, qui bénéficie actuellement de l'influence du Gulf Stream dont la dérive d'Ouest est liée à cette circulation thermohaline ;

- le comportement du carbone des sols : nous avons vu que l'évolution future des flux de carbone se caractérise par un affaiblissement progressif de l'efficacité des puits naturels de carbone, aussi bien dans l'océan que sur les continents. Néanmoins, le phénomène le plus préoccupant concerne l'évolution du stock de carbone des sols sous l'effet du changement clima-

tique. Selon certaines études récentes, le réchauffement climatique transformerait le puits biosphérique en une source vers les années 2070 (Cox et al., 2000), principalement à cause de son effet accélérateur sur la respiration des sols. Une telle contre-réaction positive entre les sources naturelles de CO₂ et le climat est très préoccupante car elle pourrait signifier un emballement de l'effet de serre. Un soutien accru à l'effort de recherche dans le domaine du couplage climat-cycle du carbone est donc nécessaire pour diminuer les incertitudes actuelles et mieux cerner les risques encourus ;

- la stabilité des hydrates de méthane : d'importantes quantités de méthane sont présentes dans les sédiments marins sous forme d'hydrates. On estime que les quantités de gaz ainsi stockées sont équivalentes à deux fois l'ensemble des réserves connues de carbone fossile, charbon inclus (USGS, 2001). Le domaine de stabilité de ces hydrates commence dès 300 mètres de profondeur dans les mers polaires (graphique 6). Les hydrates de méthane sont également présents dans les sols gelés de l'Arctique (permafrost). Dans les hautes latitudes, domaine où l'amplitude du réchauffement climatique sera la plus marquée, le diagramme de stabilité montre qu'une élévation même modeste des températures des sols et des eaux des marges continentales est susceptible de déstabiliser une partie de ce stock de gaz, dont le pouvoir de réchauffement est vingt fois supérieur à celui du CO₂. La réalité d'un tel dégazage semble attestée par diverses observations, en particulier l'analyse des isotopes du carbone ($\delta^{13}\text{C}$) couvrant la période du quaternaire récent (Kennett et al., 2000). Actuellement, les incertitudes sur les quantités de méthane pouvant être ainsi mobilisées sont trop importantes pour tenter une évaluation du risque climatique lié à un tel phénomène (GIEC, 2001a et b).

5. Diagramme de stabilité des hydrates de méthane en température et pression



Source : CNRS-CEA.

Conclusions

Depuis le début de l'ère industrielle, la teneur atmosphérique en CO₂ ne cesse d'augmenter. Au rythme actuel, on prévoit qu'elle aura doublé vers le milieu du XXI^e siècle. Le renforcement de l'effet de serre lié aux activités humaines, et tout particulièrement aux rejets massifs de gaz carbonique provenant de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), a commencé de modifier le climat de la terre. Certains indices de ce changement sont déjà clairement discernables dans les paramètres climatiques. Il est donc possible d'affirmer aujourd'hui, suivant en cela les conclusions du troisième rapport du GIEC (GIEC, 2001a), que le réchauffement du climat est en marche.

Dans quel climat vivront donc nos enfants et petits-enfants ? Quelles répercussions le réchauffement climatique aura-t-il sur le régime des pluies ? Quel impact peut-on prévoir sur l'agriculture, sur la santé, selon les régions du globe ? Quelles conséquences sur la fréquence d'apparition des aléas climatiques tels que inondations, sécheresses, ouragans, cyclones, etc. et sur l'économie en général ? Les recherches menées actuellement sont destinées à fournir ces réponses. Des progrès très importants ont été accomplis dans la connaissance du système climatique et dans la compréhension du rôle central joué par le cycle du carbone. Néanmoins, des incertitudes nombreuses subsistent, quant à la prévision de l'ampleur réelle des changements à venir et de leur impact sur les écosystèmes et l'environnement, en particulier à l'échelle régionale. Des rétroactions potentiellement catastrophiques sont également envisageables, dont la compréhension doit absolument progresser.

Peut-on éviter ce changement de climat ? Dans une certaine mesure, la réponse est négative puisque le mal est pour partie déjà fait : la teneur en CO₂ de l'air a déjà beaucoup augmenté et le climat est en train de s'ajuster au forçage thermique additionnel de l'effet de serre. Il est donc essentiel de poursuivre l'effort de recherche, afin de mieux caractériser les risques encourus et de mieux anticiper les impacts.

Pour l'avenir cependant, afin de limiter les conséquences d'un dérèglement climatique massif, il est également essentiel de s'orienter vers une limitation drastique des rejets de gaz à effet de serre, faisant appel à une mutation majeure, technologique et culturelle, des secteurs incriminés. La Convention des Nations Unies sur le changement climatique, signée en mai 1992, puis la conférence de Kyoto (décembre 1997) marquent un premier pas dans cette direction. Clairement, d'autres pas, plus importants encore, seront nécessaires.

Références bibliographiques

- Acacia Project (2000) : « Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe », *Jackson Environment Institute*, University of East Anglia, Norwich, Royaume-Uni.
- Arrhenius S. (1896) : « On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground », *Philosophical Magazine*, 41, 251.
- Bousquet P., P. Peylin, P. Ciais, C. Le Quéré, P. Friedlingstein et P. Tans (2000) : « Regional Changes in Carbon Dioxide Fluxes of Land and Oceans Since 1980 », *Science*, 290, pp. 1342-1346.
- Broecker W.S. (1997) : « Thermohaline Circulation, the Achilles Heel of our Climate System: Will Man-Made CO₂ Upset the Current Balance? », *Science*, 278, pp. 1582-1588.
- Broecker W.S. et T.S. Peng (1982) : « Tracers in the Sea », *Lamont-Doherty Earth Observatory*, Columbia University, Palisades, New York.
- Cox P.M., R.A. Betts, C.D., Jones, S.A. Spall. et I.J. Totterdell (2000) : « Acceleration of Global Warming Due to Carbon-Cycle Feedbacks in a Coupled Climate Model », *Nature*, 408, pp. 184-187.
- Duplessy J.C., N.J. Shackleton, R.G. Fairbanks, L. Labeyrie, D. Oppo et N. Kallel (1988) : « Deep Water Source Variations During the Last Climatic Cycle and their Impact on the Global Deep Water Circulation », *Palaeoceanography*, 3, pp. 343-360.
- Etheridge D.M., L.P. Steele, R.L. Langenfelds, R.J. Francey, J.M. Barnola et V.I. Morgan (1996) : « Natural and Anthropogenic Changes in Atmospheric CO₂ over the Last 1,000 Years from Air in Antarctic Ice and Firn », *Journal of Geophysical Research*, 101, pp. 4115-4128.
- Friedlingstein P., L. Bopp, P. Ciais, J.L. Dufresne, L. Fairhead, H. Le Treut, P. Monfray et J. Orr (2001) : « Positive Feedback Between Future Climate Change and the Carbon Cycle », *Geophysical Research Letter*, 28(8), pp. 1543-1546.
- GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996) : *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*, Cambridge University Press, Royaume-Uni.
- GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000a) : *Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Royaume-Uni.
- GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2000b) : *Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie*, Rapport spécial, Cambridge University Press, Royaume-Uni.

- GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001a) : *Climate Change 2001. The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Royaume-Uni.
- GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001b) : *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press, Royaume-Uni.
- IEA (International Energy Agency) (2001) : *Key World Energy Statistics*, Agence Internationale de l'Énergie, Paris.
- Keeling C.D. et T.P. Whorf (1998) : « Atmospheric CO₂ Concentrations Derived from in situ Air Samples Collected at Mauna Loa », *Hawaii Scripps Institute of Oceanography*, La Jolla, University of California.
- Kennett J.P., K.G. Cannariato, I.L. Hendy et R.J. Behl (2000) : « Carbon Isotopic Evidence for Methane Hydrate Instability During Quaternary Interstadials », *Science*, 288, pp. 128-133.
- Lal R. (2000) : « World Cropland Soils as Source or Sink for Atmospheric Carbon », *Advanced Agronomy*, 71, pp. 145-191.
- Levitus S., J.I. Antonov, T.P. Boyer et C. Stephens (2000) : « Warming of the World Ocean », *Science*, 287, pp. 2225-2229.
- Siegenthaler U. et J.L. Sarmiento (1993) : « Atmospheric Dioxide and the Ocean », *Nature*, 365, pp. 119-125.
- Sigman D.M. et E.A. Boyle (2000) : « Glacial/Interglacial Variations in Atmospheric Carbon Dioxide », *Nature*, 407, pp. 859-869.
- Stocker T. et A. Schmittner (1997) : « Influence of CO₂ Emission Rates on the Stability of the Thermohaline Circulation », *Nature*, 388, pp. 862-865.
- USGS (United States Geological Survey) (2001) : « Natural Gas Hydrates: Vast Resource, Uncertain Future », *USGS Fact Sheet*, FS-021-01, mars.

Complément B

Évaluer les dommages : une tâche impossible ?^(*)

Philippe Ambrosi et Jean-Charles Hourcade

*Centre international de recherche
sur l'environnement et le développement (CIRED),
Unité mixte de recherche CNRS-EHESS 8568*

En juin 1992, la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques stipula qu'il convenait d'empêcher : « toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique (...) dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter (...), que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable » (Article 2, UNFCCC, 1992). Le caractère remarquablement flou de cet objectif est, entre autres, dû au fait que des indicateurs appropriés font défaut pour renseigner le vocable *dangereux*.

Ce problème a été longtemps contourné par des exercices étudiant la façon la moins coûteuse d'atteindre un jeu donné de plafonds de concentration reflétant chacun diverses « croyances » sur le niveau d'interférence dangereuse et diverses attitudes vis-à-vis du risque. Mais, au fur et à mesure que l'on s'est approché de décisions opérationnelles, les débats sur la justification des niveaux de concentration et de la répartition régionale des efforts se sont faits plus intenses, ce qui a conduit à prendre le risque de l'évaluation des dommages climatiques malgré les difficultés persistantes signalées par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC, ou IPCC en anglais, voir GIEC/TAR/WGII, chap. XIX).

(*) Les auteurs tiennent à remercier C. Boemare (CIRED) pour sa relecture attentive du texte et ses commentaires et suggestions.

Il convient ici de bien distinguer deux types d'efforts. Le premier porte sur les conséquences d'un scénario de réchauffement sur les écosystèmes, les activités productives et les implantations humaines (ainsi, les résultats du projet Acacia, 2000) pour des travaux régionaux à l'échelle européenne ou le National Assessment of Climate Change (NACC)⁽¹⁾ aux États-Unis). Il permet de brosser à grands traits un tableau de la vulnérabilité des secteurs de l'économie ou des régions du globe, d'identifier des potentiels techniques d'adaptation et de proposer une évaluation des impacts résultants. Le second vise à traduire ces informations de nature physique (hausse du niveau de la mer, changement dans le rendement des cultures, violation de standards de qualité de vie, dégradation d'indices de biodiversité) dans une métrique commune, monétaire, pour écrire des fonctions de dommages qu'on pourra comparer au coût des politiques d'adaptation et de réduction des émissions.

En raison des très grandes incertitudes qui entourent les phénomènes à l'œuvre, très peu d'économistes se sont risqués à ce calcul fort hasardeux et aujourd'hui, seulement trois études donnent par grande région du monde et par secteur d'activité une évaluation économique des impacts du changement climatique. Ces travaux pionniers ont servi au calibrage des fonctions de dommage couramment utilisées dans les modèles mais leurs résultats restent très fragiles car tout un travail reste à faire sur l'information de base qui supporterait des évaluations robustes. Nous ne prétendons pas dépasser ces travaux dans le cadre de ce complément. En revanche, nous nous efforcerons de clarifier la nature des déterminants de la transformation des impacts aux dommages afin de mieux appréhender les risques que fait peser le changement climatique.

Une première section sera consacrée à l'exposé des différents chemins qui conduisent des impacts aux dommages pour lever les ambiguïtés persistantes qui entourent ces deux notions. Dans une deuxième section, cette distinction permettra de souligner les limites actuelles du traitement des dommages dans les modèles intégrés, en particulier pour ce qui concerne les principales sources de potentielles non-linéarités, paramètres dont nous verrons l'importance pour la décision. Dans une troisième section, nous mettrons l'accent sur l'importance de l'agrégation temporelle et spatiale des dommages comme un écueil important de la représentation du risque climatique dans le processus de négociation.

1. La transformation des impacts en dommages : un essai de cadrage

Un dommage est la variation de bien-être des populations provoquée par les rétroactions des changements climatiques sur les systèmes naturels et l'activité humaine. Évaluer une telle variation renvoie à la fois aux ca-

(1) Programme dont les publications sont disponibles sur : www.usgcrp.gov/usgcrp/nacc/default.htm

naux par lesquels le système économique pourrait être affecté, mais aussi à des jugements de valeur ou des choix éthiques, dont la formulation est souvent controversée : comment déterminer les pertes et gains en bien-être d'une translation à Deauville du climat de Biarritz ? Quelle valeur donner à la préservation des babouins Gelada (derniers représentants d'un genre de primates herbivores jadis prospère) ou à celle des récifs coralliens pour empêcher le changement climatique de s'ajouter à la liste des facteurs qui les menacent ? Comment évaluer le coût des *climate change refugees* (Parry, 1999) ou des aides destinées à garantir la sécurité alimentaire des populations vulnérables ? Comment intégrer les risques de propagation de chocs locaux ? Pour répondre à ces questions, il faut comprendre pourquoi il est impossible de traduire des impacts en dommages par simple attribution d'une « valeur » à un impact donné sans vision d'ensemble des phénomènes d'amplification ou de compensation au sein du système économie/environnement/société.

1.1. Une taxonomie des impacts du changement climatique

Pour identifier par quels mécanismes le changement climatique peut induire une variation de bien-être, nous établissons une taxonomie des impacts du changement climatique présentée dans l'encadré 1.

1. Taxonomie des impacts climatiques : les trois vecteurs primaires par où peuvent s'enclencher des mécanismes à l'origine d'une baisse du niveau de l'utilité « de référence »

Dégradation de la productivité du capital naturel et du facteur humain

- *Variation du rendement de différentes cultures pour des scénarios climatiques et socio-économiques contrastés* : pas de rupture à l'échelle mondiale de l'équilibre offre/demande de biens agricoles mais transformation importante de la géographie de la production et aggravation des risques pour la sécurité alimentaire des zones vulnérables.

- *Ressources en eau* : aggravation de la situation dans les régions connaissant déjà un stress hydrique (Asie centrale, Sud de l'Afrique, Bassin méditerranéen) où vivent 1,7 milliard d'individus, soit un tiers de la population mondiale. En 2025, cet effectif pourrait atteindre 5 milliards d'individus, selon les scénarios de croissance de la population (GIEC/TAR/WGII, TS). La modification du régime des cours d'eau pourrait réduire la capacité de production hydroélectrique dans plusieurs régions : exemple de la sécheresse au Nord-Est et au Sud-Est du Brésil et problèmes d'alimentation en énergie électrique (rationnement des populations) pendant la seconde moitié de l'année 2001.

- *Tourisme* : diminution du nombre de jours d'enneigement à une altitude de 1 500 mètres (Martin, 2000) de 45 % dans les Pyrénées, de 40 % dans les Alpes du Sud, de 20-25 % dans les Alpes du Nord.

- *Santé humaine* : effets directs (pics de mortalité pendant les vagues de chaleur estivales en ville). Effets indirects : lien entre changement climatique et qualité de l'air en ville, extension probable de l'aire géographique de certaines maladies à vecteurs, risque de développement de maladies infectieuses et parasitaires dans les PED à la suite de catastrophes naturelles d'origine climatique.

Accélération de l'obsolescence du capital productif et des infrastructures

- *Vulnérabilité accrue* due à une plus grande fréquence des événements météorologiques extrêmes. L'assureur Allianz estime à 15 G le coût des inondations de 2002 en Allemagne : dommages aux habitations (quatre millions de personnes concernées), monuments historiques, ponts, routes et lignes de chemins de fer endommagés ou emportés (500 km de rail à reconstruire selon la Bundesbahn).

- *Régions côtières* : submersion des zones basses (deltas, littoraux à lagune, marais maritimes), accélération de l'érosion des côtes, renforcement de la salinisation des sols et des nappes phréatiques côtières, augmentation du risque de surcôte des zones côtières. 80 millions d'individus supplémentaires seraient touchés annuellement par une inondation pour une hausse du niveau des mers de 40 cm vers 2080 (Nicholls et al., 1999) avec une répartition régionale très inégale. Une surcôte de 1,4 m dans l'estuaire de la Loire pour une élévation de 30 cm du niveau des mers serait à redouter tous les 10 ans au lieu de tous les 100 ans actuellement (Deneux, 2002).

- *Dégel permanent ou saisonnier du permafrost dans les zones montagneuses et boréales* avec des conséquences sur la stabilité des terrains (en Russie, des immeubles de 5 étages construits entre 1950 et 1990 sont déjà endommagés). En l'absence de mesures particulières, l'essentiel des constructions seraient inutilisables vers 2030 (bassin de la Léna). Conséquences importantes pour les routes, les pistes d'atterrissage, les pipelines et pour l'industrie minière (Weller et al., 1999). Pour les zones montagneuses, augmentation du risque de glissement de terrains dans des zones réputées « sûres » (Beniston, 2000).

Altération des aménités fournies par l'environnement

- *Ensemble des « satisfactions » présentes et futures retirées des services offerts par l'environnement :*

- préoccupations hédonistes : satisfaction liée aux loisirs dans une belle nature, habitat avec haute qualité de vie ;
- valeurs d'existence : pertes de biodiversité, valeurs de legs et valeur patrimoniale des paysages (glaciers de montagne, préservation de Venise ou du Mont St Michel, protection des récifs coralliens comme sites de plongée et/ou comme écosystèmes marins).

- *Ensemble des facteurs qui contribuent à une aversion spécifique au risque d'une rupture de l'environnement (cf. sondage conduit par Nordhaus, 1994a et Roughgarden et al., 1999) :* la préférence pour la stabilité actuelle peut venir du refus d'un pari faustien en raison des incertitudes qui pèsent sur l'évolution d'un support essentiel de la vie sur terre, des activités productives, de la qualité de vie.

1.2. Effets de propagation et inflexion des sentiers de croissance

De cette tentative de taxonomie, on peut comprendre qu'il y a loin des impacts aux dommages : c'est la résultante des impacts du changement climatique au travers des relations entre économie, environnement et société qui conduit *in fine* aux dommages.

Il est possible d'identifier un premier écueil méthodologique des évaluations monétaires aujourd'hui disponibles. Ces études ont en effet cherché à estimer les conséquences d'un scénario de changement climatique comme la simple somme des impacts directs – c'est-à-dire tous les points d'entrée que nous avons présentés à la section précédente et qui sont le reflet de la vulnérabilité au changement climatique des activités productives, de l'environnement et des implantations humaines – et ce, en suivant une approche d'équilibre partiel. Elles n'ont donc pas pris en compte dans leur évaluation, comme l'aurait permis une approche d'équilibre général, la résultante sur les volumes produits, sur les prix, sur les niveaux d'investissement, de la diffusion de ces impacts directs au long des relations entre environnement, activités productives et décisions des agents. C'est l'origine de la critique formulée par Fankhauser (1994) à l'encontre de l'approche *énumérative*, suivie dans la majorité des cas. Une telle approche n'est pas à même de traduire les effets de propagation (atténuation, amplification) des systèmes socio-économiques en réponse aux impacts directs du changement climatique. Une approche d'équilibre général devrait essayer de prendre en compte en plus des coûts *directs* du changement climatique les coûts *indirects*, imputables aux interconnexions d'une économie.

Ainsi, en supposant que seule l'agriculture sera vulnérable au changement climatique, une mesure correcte des dommages ne peut pas être la seule perte de production nette du secteur agricole à la suite d'une baisse de la productivité imputable au changement climatique. Après tout, il peut exister des phénomènes de compensation au long de la filière agro-alimentaire : si la production agricole baisse dans une région, il est toujours possible de faire appel aux importations, les exploitants agricoles peuvent adapter les systèmes de production (s'ils ne sont pas *surpris* par le changement climatique et s'ils disposent des ressources nécessaires), on peut assister à des conversions d'activité. Dès lors, même si le secteur agricole de cette région semble *a priori* vulnérable, il peut se faire qu'*in fine* l'économie soit capable de répondre à cet impact.

À l'inverse, une baisse des rendements des cultures peut entraîner des conséquences économiques et sociales très lourdes pour les populations exposées. Par exemple, dans les estimations de Mendelsohn et *al.* (1997), le secteur agricole en Afrique souffre (en raison du changement climatique) d'une perte de production de 132 milliards de dollars, soit 4,7 % du PIB régional. Si la production agricole marque un tel recul, il est vraisemblable que les prix des denrées alimentaires augmentent ; vu la difficulté d'accès

de certains pays aux marchés internationaux, des communautés vulnérables, comme les pauvres urbains, les communautés rurales qui vivent souvent de l'agriculture vivrière, ne pourront peut-être plus satisfaire leurs besoins fondamentaux. En même temps, le bilan peut inclure chômage, déplacement des populations vers la périphérie des villes.

En dehors de la modification des volumes disponibles et des prix relatifs de certains produits essentiels, comme les denrées alimentaires, le point important est que l'accélération de l'obsolescence du capital en place et la baisse de productivité du capital naturel auront une influence sur les dynamiques économiques de long terme, en particulier sur les dynamiques d'investissement. Et c'est là un deuxième écueil méthodologique des évaluations monétaires des impacts. Ces études ont en effet cherché à estimer les conséquences d'un scénario de changement climatique sur la production *annuelle* d'une région sans évaluer comment évolue le niveau d'investissement. Certes, elles donnent des informations sur les pertes en bien capital (qu'elles comparent d'ailleurs au revenu annuel) mais ne donnent pas d'estimation des conséquences à plus long terme.

Or si les impacts sont significatifs, la production atteint un niveau plus faible que la production « de référence » et une partie de l'épargne et de la consommation est affectée à des travaux de réparation et des investissements de protection. L'investissement pour la production du bien de consommation courante est donc plus faible que dans un scénario « de référence »⁽²⁾. Il est bien sûr difficile de fournir une quelconque estimation pour ce type de mécanisme⁽³⁾ mais il faut bien comprendre qu'un euro perdu en capital a, sur la croissance économique, un impact plus important qu'un euro perdu sur la consommation courante.

À côté de cas exceptionnels où le changement climatique pourrait être un frein supplémentaire au développement⁽⁴⁾, les seuls chiffres disponibles qui permettent une première estimation des coûts de réparation sont donnés par le secteur de l'assurance (ceci étant vrai surtout pour les pays développés). Par ailleurs, selon des évaluations de Tol (1995), reprises par l'assureur Munich Re, les dépenses de protection des côtes contre la montée du niveau de la mer et les investissements d'adaptation entrepris dans le do-

(2) C'est d'ailleurs un obstacle méthodologique important lors de l'écriture de scénarios socio-économiques. La pratique actuelle consiste à projeter un scénario économique de référence, d'en dériver des émissions et des coûts des politiques de réduction des émissions et des politiques d'adaptation, en supposant que ce scénario n'est pas affecté par les dommages.

(3) Par exemple, l'impact des deux tempêtes de l'hiver 1999-2000 sur la croissance française est controversé ; de même, l'évaluation temporaire des dommages proposée par l'assureur Allianz en Allemagne ne représente que 0,7 % de son PIB de l'année dernière. Cependant, la répétition de tels événements pourrait infléchir la dynamique économique des régions qui les subissent.

(4) Ainsi, la Banque mondiale estime qu'en 2050 l'atoll de Tarawa dans l'Archipel des Kiribati pourrait faire face du fait du changement climatique à des impacts représentant 13 à 27 % du PIB actuel de l'archipel entier, qui fait face à des coûts de l'ordre de 17 à 34 % de son PIB actuel (World Bank, 2000).

maine de la gestion des ressources en eau pourraient atteindre un montant annuel respectivement de 1 milliard et 14,7 milliards de dollars pour l'Union européenne.

Mais surtout, dans une économie mondialisée où les phénomènes de confiance et de défiance se propagent avec une grande rapidité, il se peut que la couche additionnelle apportée par les désordres climatiques (craints ou avérés) soit suffisamment significative pour affecter la confiance des décideurs économiques et des populations dans des régions durement touchées (la région toulousaine après la catastrophe AZF), ou pour induire une *grande peur* du changement climatique et de ses conséquences qui conduise à surinvestir dans les dépenses de protection. Bien sûr, une demande accrue de biens et services qui relèvent des stratégies d'adaptation (assurance, BTP, santé, eau) participe de la croissance mais celle-ci sera peut-être moins dynamique que dans une situation où moins de financement est détourné vers ces seuls secteurs.

2. Évaluer les dommages, apprécier les risques

La taxonomie que nous venons de commenter permet de détecter les diverses modalités de transformation des impacts en dommages climatiques. Elle a donc une valeur heuristique mais on ne dispose aujourd'hui ni des données, ni des connaissances suffisantes pour la transformer en outil fiable d'évaluation des dommages, sans compter les difficultés de résolution numérique en cas de relations fonctionnelles trop complexes entre ses variables. C'est la principale raison pour laquelle les modèles intégrés du changement climatique – et parmi eux, les modèles DICE et RICE (Nordhaus, 1994b et 1996) – retiennent des fonctions simples et agrégées. Cette simplification n'est pas critiquable en soi « faute de mieux ». Mais, comme ces modèles concluent à un effort modeste de réduction des émissions, au moins pendant les premières décennies (Kelly et *al.*, 1999), il importe de bien comprendre les raisons techniques de ces recommandations avant d'en tirer des conclusions définitives pour la décision publique. Essentiellement, les fonctions agrégées retenues :

- reposent sur un unique point de calibrage agrégé : il s'agit en effet d'estimations ponctuelles à la croisée d'un scénario économique et d'un scénario climatique, au moment du doublement de la concentration préindustrielle de CO₂. Aucune information n'est donc disponible pour des niveaux de concentrations de GES plus élevés ni pour une amplitude du réchauffement plus forte (comme on peut le constater dans le tableau ci-après, l'élévation de la température moyenne globale envisagée ne dépasse pas + 2,5° C) ;

- retiennent l'élévation de la température moyenne globale comme le seul déterminant climatique étudié alors que les impacts dépendent fortement de l'évolution du régime des précipitations ou de la variabilité du climat (par exemple, l'augmentation vraisemblable de la variabilité des précipitations de la mousson d'été en Asie) ;

- ne sont pas sensibles à l'influence du rythme du changement : elles correspondent aux impacts d'un climat modifié mais non d'un climat en transition plus ou moins chaotique vers ce régime stabilisé. Comme l'indiquent Schneider et al. (2000) : « *Any exercise, which neglects surprises or assume transitivity of the earth system (i.e., a path-independent response) is, therefore questionable, and should carry a warning to users of the fundamental assumptions implicit in the technique dependent on steady state results* » ;

- ne reflètent pas les très fortes marges d'incertitude imputables à l'amplification des incertitudes tout au long de la cascade de modèles utilisés pour les obtenir. Par exemple, les incertitudes sont beaucoup plus fortes sur les scénarios climatiques régionalisés (nécessaires à l'estimation des impacts) que pour les chiffres globaux de hausse des températures ;

- utilisent des fonctions dommages monotones, où les dommages croissent de façon linéaire, quadratique ou cubique avec la température.

Cette dernière caractéristique, portant sur la forme même des fonctions mathématiques choisies, est probablement la plus déterminante. La raison technique en est donnée par Hourcade et Lecocq (voir complément D) ; pour en avoir l'intuition, il suffit de se rendre compte qu'il est toujours opportun de reporter l'action tant que le taux de croissance temporel du dommage marginal reste inférieur au produit du taux d'actualisation et du rythme de la baisse du coût marginal des technologies sans carbone, ce qui même avec une fonction de dommages cubique ne se produit qu'à un horizon lointain (Hourcade et al., 1995). En reportant l'action, l'augmentation des dommages est en effet plus que compensée par l'augmentation du revenu. Les choses changent en revanche lorsqu'on imagine des évolutions non monotones avec des effets de seuil. Comme les scénarios du GIEC indiquent la possibilité d'élévations de température beaucoup plus importantes que 2° C (jusqu'à + 5,8° C) à échéance 2100, on ne saurait aisément écarter la possibilité de tels effets de seuils pour un réchauffement aussi important dans un intervalle de temps aussi bref.

C'est pourquoi, les spécialistes des études d'impact ont souligné dans le troisième rapport du GIEC que les fonctions de dommages « régulières » peuvent donner des représentations biaisées des phénomènes à l'œuvre : « *Little is known about the shape of the aggregate impact function. Dynamic functions remain highly speculative at this point because the underlying models provide only a very rough reflection of real-world complexities. Although some analysts still work with relatively smooth impact functions, there is growing recognition that climate change dynamics might in fact be more complex and may not follow a monotonic path* » (GIEC/TAR/WGII, chap. 19). Devant l'éventualité de non-monotonie des dommages climatiques, certains économistes reconnaissent avec inquiétude que de tels événements ont été très peu pris en compte dans le processus d'élaboration des politiques climatiques. Ainsi, Yohe confie à l'occasion de la publication du rapport de l'Académie des sciences américaine consacré aux non-linéarités climatiques (The National Academies, 2002) « *[my] biggest fear is that*

international policy is being made based on smooth climate change » (*The Boston Globe*, 12 décembre 2001). En fait, pour s'en tenir à l'espace scientifique américain Peck et Teisberg démontraient dès 1993 que les politiques climatiques sont beaucoup plus sensibles à l'incertitude sur le paramétrage de la forme de la fonction de dommages qu'à l'incertitude sur le niveau de dommages pour une élévation donnée de la température.

Estimations régionalisées des impacts du changement climatique

En % du PIB régional

	Mendelsohn et al.			Nordhaus et al.	Tol
	+ 1,5° C ^(*)	+ 2° C ^(**)	+ 2,5° C ^(*)	+ 2,5° C	+ 1° C
Amérique du Nord		0,3			3,4 (1,2)
• États-Unis			0,3	- 0,5	
OCDE Europe		0,4			3,7 (2,2)
• Union européenne				- 2,8	
OCDE Pacifique					1,0 (1,1)
• Japon			- 0,1	- 0,5	
Europe de l'Est/CEI					2,0 (3,8)
• Europe de l'Est				- 0,7	
• Russie		1,1	11,1	0,7	
Moyen Orient				- 2,0	1,1 (2,2)
Amérique latine		- 1,3			- 0,1 (0,6)
• Brésil			- 1,4		
Asie du Sud et du Sud-Est		- 0,8			- 1,7 (1,1)
• Inde			- 2,0	- 4,9	
• Chine		0,4	1,8	- 0,2	2,1 (5,0)
Afrique		- 4,7		- 3,9	- 4,1 (2,2)
Pays développés	0,12	0,1	0,03		
PVD	0,05	- 0,8	- 0,17		
Total mondial					
• pond. PIB	0,09	- 0,3	0,1	- 1,5	2,3 (1,0)
• pond. population				- 1,9	
• prix moyens mondiaux					- 2,7 (0,8)
• pond. équité					0,2 (1,3)

Lecture : Les nombres positifs (resp. négatifs) désignent des bénéfices (resp. des pertes). Ces estimations sont largement incomplètes et entachées de très fortes marges d'incertitude : les chiffres donnés par Tol (écart-type) sont en fait des bornes inférieures de l'incertitude en présence. En conséquence, les évaluations peuvent être très divergentes à l'échelle régionale : pour un même réchauffement (+ 2,5° C), les mêmes régions sont tour à tour bénéficiaires ou très exposées.

Dans la partie inférieure du tableau, est calculé un impact résultant mondial. Dans tous les cas, il s'agit d'un chiffre faible. Il est intéressant de constater que selon les considérations d'équité qui président à la procédure d'agrégation, ce total peut changer de signe (Tol).

Sources : Mendelsohn et al. [(*) 2000 ; (**) 1997], Nordhaus et al. (2000) et Tol (1999).

2.1. Problèmes de rythme, de seuils et d'incertitude

L'utilisation de fonctions présentant une croissance régulière du niveau de dommages (exprimé par exemple en pourcentage du PIB perdu sous l'effet du changement climatique) revient en fait à supposer l'absence de seuils de dangerosité au-delà desquels les dommages croîtraient très rapidement. Pourtant, les résultats récents de Parry et *al.* (2001) mettent en évidence une croissance soudaine du nombre de personnes risquant de souffrir de pénuries en eau du fait du changement climatique à partir d'un seuil de réchauffement de 1,5° C, et ce dès 2080.

Mais compte tenu des nombreuses incertitudes qui demeurent sur la dynamique du climat, on ne sait pas quand de tels seuils peuvent être franchis pour un scénario donné d'émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est ce qui est représenté graphique 1 pour un exemple théorique où le seuil de danger correspond à un réchauffement de 2° C, l'incertitude portant ici uniquement sur la sensibilité du climat⁽⁵⁾. Selon la valeur de ce paramètre, le montant des dommages en 2100 varie d'un facteur 5,5. Si la sensibilité du climat est faible, le seuil n'est pas franchi et on retrouve une fonction de dommages « régulière » ; à l'inverse, si la sensibilité du climat est élevée, des non-linéarités se manifestent dès 2070. Si on se contente d'observer le profil temporel moyen des dommages (c'est-à-dire l'espérance sur les sept trajectoires équiprobables), on masque l'occurrence de telles non-linéarités en obtenant un signal à croissance régulière.

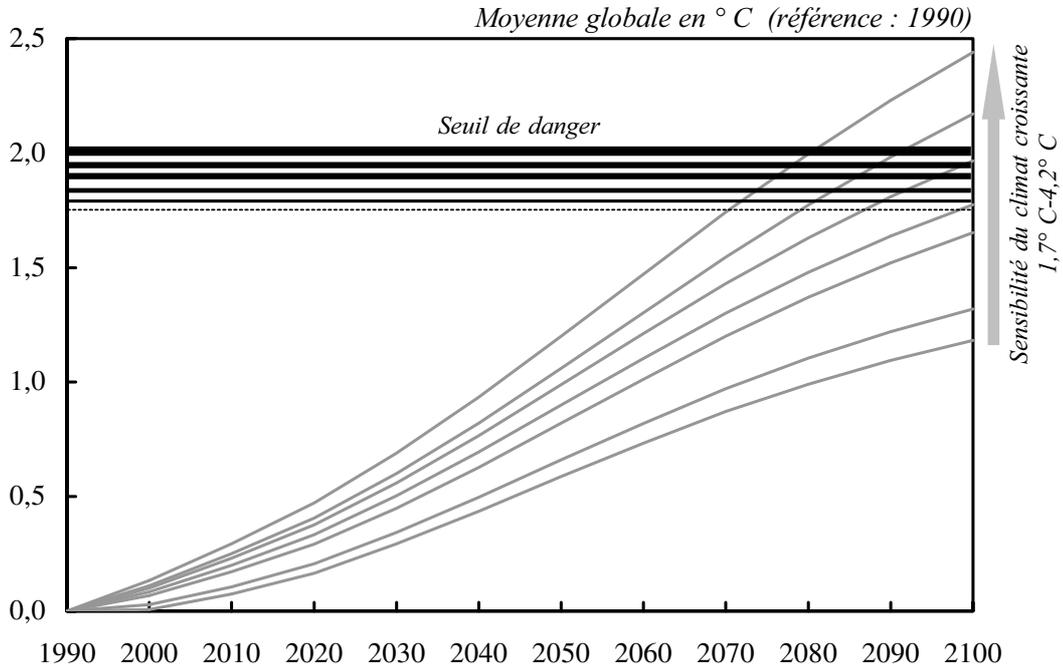
Or la perspective d'effets de seuil très incertains mais suffisamment proches dans le temps peut alors justifier des efforts de réduction plus précoces, même sans faire l'hypothèse de dommages à plus long terme très élevés, puisque le dommage marginal croît plus vite dans le temps que la croissance économique quand on s'approche du seuil. Dumas et Ha-Duong (2002) démontrent de même que la stratégie optimale est davantage sensible à la position du seuil (son occurrence dans le temps) qu'à l'amplitude du saut dans la fonction de dommages.

Comme on peut le constater graphique 1, la date à laquelle ce seuil est franchi dépend entre autres de la valeur de la sensibilité du climat. S'il s'avérait que des dommages explosifs se produisent au-delà d'un réchauffement de 2° C, éviter un tel seuil peut impliquer, selon les modèles climatiques utilisés, de viser un plafond de concentration dans un éventail très large, de 430 à 630 parties par million (ppm) en volume. La première cible implique un freinage des émissions quasi immédiat tandis que la seconde reste atteignable même avec un report des actions de quelques décennies.

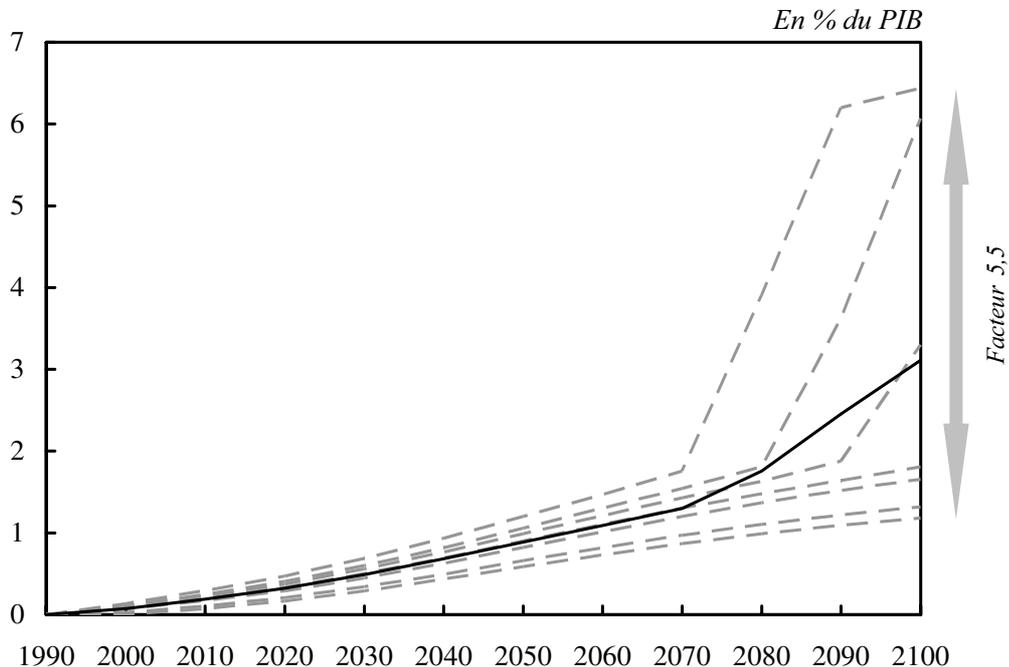
(5) La sensibilité du climat est un paramètre synthétique qui permet de comparer le réchauffement obtenu par les différents modèles climatiques existants ; c'est une première mesure de l'incertitude sur la dynamique du climat. Elle est définie comme l'augmentation de la température moyenne globale de l'atmosphère quand le climat a atteint un nouvel équilibre en réponse à forçage constant (un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ par rapport à sa valeur à l'époque pré-industrielle). Plus la sensibilité du climat prend une valeur élevée, plus le réchauffement est important. L'incertitude sur ce paramètre est très importante : sa valeur se trouve *vraisemblablement* dans l'intervalle [1,5° C ; 4,5° C] (GIEC/TAR/WGI, chp. 9).

1. Dommages non linéaires et incertitudes

a. Hausse relative de la température



b. Croissance des dommages climatiques



Lecture : Pour un même scénario de concentration atmosphérique de CO₂, l'existence d'incertitude sur la sensibilité du climat (estimée ici à partir de sept modèles climatiques) induit des trajectoires de dommages très contrastées, s'il existe un seuil de réchauffement dangereux au-delà de 2° C (courbes pointillé gris clair). Le signal moyen masque néanmoins l'occurrence de telles non-linéarités et correspond à une fonction de dommages régulière (courbe trait plein noir sur graphique 1b).

Source : Scénario A1M, SRES, 2001.

2. Trois sources de non-linéarités dans la réponse des systèmes naturels au changement climatique

Surprises climatiques et catastrophes climatiques

Transitions brutales du climat (quelques décennies) et de grande amplitude dont plusieurs occurrences ont été mises en évidence en paléoclimatologie, comme les événements de type Dansgaard-Oeschger (Rahmstorf, 2002). Ces phénomènes conservent encore un caractère spéculatif :

- interruption potentielle de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord, voire son extinction complète (Manabe et Stouffer, 1993 et Rahmstorf et al., 1999). Phénomène qui s'est déjà produit par le passé en l'intervalle de quelques décennies (Schneider et al., 2000b et Mastrandrea et al., 2001). L'Europe océanique serait privée d'un important flux de chaleur et sa température chuterait de 5 à 10° C. Évènement irréversible aux échelles de temps de mise en œuvre des politiques climatiques ;
- effondrement de la partie ouest de l'Antarctique dans la mer ;
- relargage massif de GES dans l'atmosphère à la suite du réchauffement du permafrost, qui participerait dès lors à une amplification du forçage.

Modifications de la variabilité du climat et événements météorologiques extrêmes : augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes

Il s'agit autant d'événements associés directement aux distributions statistiques des paramètres du climat (extrema quotidiens, épisodes orageux) que de phénomènes météorologiques plus complexes (sécheresse, cyclones ou tempêtes des moyennes latitudes) (Easterling et al., 2000) :

- selon Palmer et Räisänen (2002), les hivers particulièrement pluvieux en Europe auxquels est associé un temps de retour de 40 ans, pourraient devenir beaucoup plus fréquents au cours du XXI^e siècle : en Écosse, au Pays de Galle, en Irlande, dans les Flandres et au Danemark, sur les côtes de la Baltique, leur temps de retour passe à huit ans, sur l'Angleterre, la moitié nord de la France et l'Europe centrale, le nord de l'Italie leur probabilité d'occurrence croît d'un facteur 3 à 5. À l'inverse sur une grande partie du pourtour méditerranéen, elle est plus faible qu'aujourd'hui. Le risque de moussons particulièrement abondantes (temps de retour actuel : 50 ans) deviendrait 2 à 3 fois plus important sur l'Inde du Nord, le Bangladesh et l'Asie du Sud-Est avec un risque accru d'inondations au Bangladesh ;

- le dépouillement des chiffres des compagnies d'assurance et de réassurance (Munich Re, 1999 et 2000 et FFSA, 2000) indique la grande vulnérabilité des implantations humaines, des infrastructures et des appareils productifs aux événements climatiques extrêmes. En France, les tempêtes successives de 1990 ont été responsables de 10 milliards de francs de dégâts. Les deux tempêtes de l'hiver 1999 dont les dommages ont atteint le montant de 44,3 milliards de francs. Inondations de Vaison la Romaine en 1992 – 38 morts et dommages évalués à 2,4 milliards de francs – et du Sud-Ouest fin 1999 – 31 morts et des pertes chiffrées à 4,2 milliards de francs. Le coût incrémental du changement climatique pour le secteur de l'assurance en France est estimé (FFSA, 2000) entre 10 et 50 milliards de francs concernant les tempêtes pour les seuls dommages aux biens ; entre 35 et 47 milliards de francs s'agissant des inondations^(*).

D'une transformation graduelle à une transformation irréversible de l'environnement

Les récifs coralliens : 58 % d'entre eux subissent des pressions d'origine anthropique comme la surexploitation ou le développement des littoraux (Bryant et al., 1998). Certains types de coraux jouant un rôle très important dans l'édification et le maintien des récifs croissent dans des eaux dont la température est proche de leur limite supérieure de tolérance thermique. Un réchauffement des eaux de surface de 1 ou 2° C (scénarios du GIEC) conduirait au franchissement de ce seuil et par conséquent à une extinction massive et irrémédiable d'écosystèmes de première importance au sein des chaînes trophiques et des équilibres naturels de l'océan. Ils sont par ailleurs une source très importante de nourriture et leur exploitation permet d'engendrer travail et revenu par le biais du tourisme, l'exportation des produits de la pêche ou de la vente de licences de pêche à des exploitants étrangers et sont parfois les seules sources de revenu et d'emploi (Spalding et al., 2001). La mort blanche des coraux et ses conséquences pour l'environnement et les populations locales pourraient entraîner en 2020 des pertes du PIB futur des petites îles du Pacifique de l'ordre de 40 à 50 % (Hoegh-Guldberg et al., 2000).

(*) De telles évaluations méritent certes d'être accueillies avec prudence et les négateurs du risque effet de serre pourraient y voir une manipulation destinée à ouvrir de nouveaux marchés. C'est d'ailleurs une question qui nous a été posée dans le processus de la Conférence des citoyens « Changement climatique et citoyenneté » (hiver 2001-2002). Nous la rappelons ici simplement parce qu'elle illustre bien une attitude de doute et de suspicion face aux incertitudes du changement climatique.

S'il est indéniable que la probabilité d'occurrence de dommages non linéaires est un paramètre-clef de la décision collective, il reste maintenant à comprendre quels mécanismes pourraient conduire à ces non-linéarités. Leurs sources potentielles se situent bien entendu d'abord dans la chaîne qui conduit des émissions aux impacts (cycle du carbone et chimie de l'atmosphère, modification du climat, réponse des écosystèmes) mais aussi, on va le voir, dans les réactions de l'économie et des sociétés.

2.2. Réponses non linéaires des systèmes naturels

Du strict point de vue des phénomènes naturels, la littérature fait référence à des dommages de natures très différentes que l'on peut regrouper en trois groupes comme le montre l'encadré 2 : les surprises climatiques et les catastrophes naturelles, les modifications de la variabilité du climat et les événements météorologiques extrêmes, et la transformation graduelle voire irréversible de l'environnement.

2.3. Réponse non linéaire des systèmes socio-économiques

Nous venons de présenter trois sources majeures de non-linéarités dans les impacts, d'origine climatique ou environnementale. On imagine sans problème les chocs qu'elles induiraient sur les activités productives, les implantations humaines et les modes de vie. Des travaux archéologiques récents (Weiss et *al.*, 2001) ont d'ailleurs établi des coïncidences entre transition brutale du climat et mutation en profondeur des sociétés (changement de mode de subsistance, abandon des terres, désorganisation socio-politique). Il faut maintenant examiner deux autres sources de non-linéarités qui sont liées à la réponse de l'économie et des sociétés aux modifications du milieu : d'une part, de possibles phénomènes d'amplification et de propagation (même des impacts dont le poids économique est négligeable pourront conduire finalement à des pertes en bien-être beaucoup plus importantes) et, d'autre part, une accélération des dommages en cas de mauvaise adaptation.

2.3.1. Points de rupture et phénomènes d'amplification : non-linéarité dans le passage des impacts aux dommages

Pour illustrer comment une évolution du climat (détérioration du bilan hydrique d'une région) ou de l'environnement (montée du niveau des mers) peut conduire à une réponse des systèmes socio-économiques fortement non linéaire, on peut partir d'un exemple simple et bien documenté qui est celui de l'Ouganda.

Pour une élévation de la température moyenne de 2° C, la surface disponible pour la culture du café en Ouganda serait dramatiquement réduite (Simonett, 1989). L'agriculture représente la principale ressource du pays : elle fait vivre 90 % des 22 millions d'habitants et génère à elle seule 80 % des emplois. Elle représente près de 45 % du PIB et 90 % des exportations.

La culture du café quant à elle est majoritairement destinée à l'exportation et assurait jusqu'en 1999 près de 65 % des revenus du pays en devises étrangères (World Development Indicators Database, avril 2001, Statistical Index, 2001 et FAOSTAT, 2001). Si, comme on l'a vu, la superficie appropriée pour la culture du café était dramatiquement réduite en raison du changement climatique, le dommage résultant ne se mesurerait pas seulement en termes de perte de productivité enregistrée pour cette culture multipliée par la part de PIB engendré par cette activité agricole. Il faudrait prendre en compte les conséquences macroéconomiques à l'échelle de l'économie nationale (déséquilibre de la balance des échanges, diminution du revenu d'une partie de la population), les conséquences sociales (chômage, déplacement de population en périphérie des zones urbaines) et éventuellement leur répercussions régionales (flux de migrants vers les pays voisins) et, dans une moindre mesure, les secousses sur le marché international du café.

Cet exemple n'est bien sûr pas unique. Les populations fixées sur les atolls sont de même directement menacées par les différentes pressions que va exercer sur leur milieu de vie le changement climatique (augmentation des inondations, submersion, pénurie d'eau, disparition des ressources liées aux récifs coralliens) (Barnett et *al.*, 2001). Sans avoir l'ampleur des exemples précédents (en particulier parce que ces impacts n'entraîneront pas de déplacements massifs de populations), sous nos latitudes un certain nombre d'activités seront menacées (sports d'hiver, vulnérabilité de certaines cultures aux événements extrêmes) et il est difficile d'en évaluer l'impact sur l'économie régionale.

2.3.2. Rythme critique de changement climatique : le poids de l'incertitude et de l'inertie

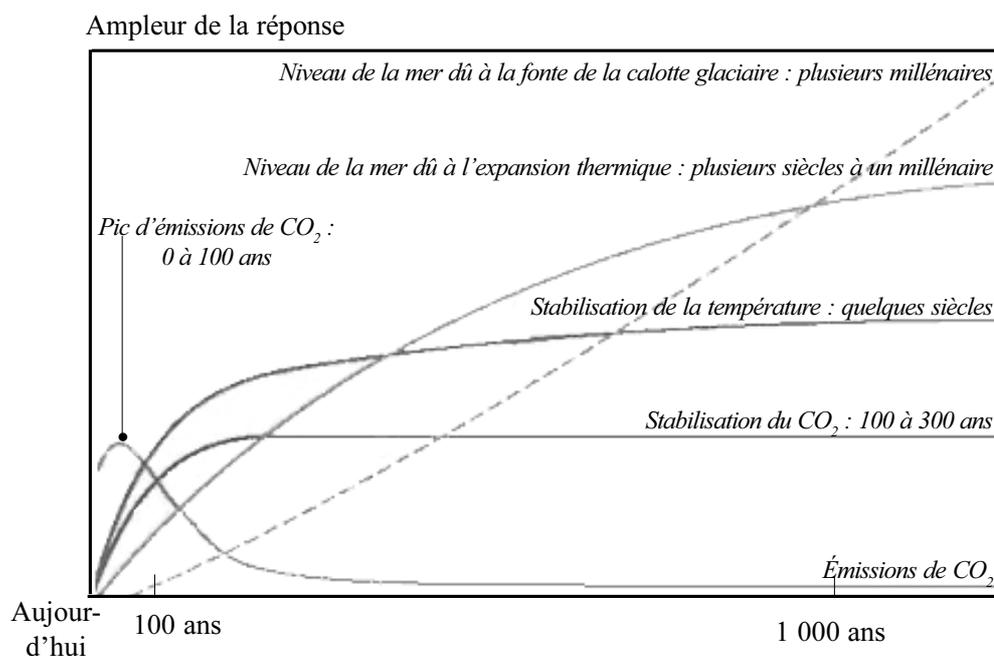
Enfin, il existe une dernière source de non-linéarité : le rythme même du changement climatique. C'est-à-dire que si le rythme du changement climatique est trop élevé vis-à-vis de nos capacités de réaction, telles qu'elles sont limitées par nos capacités techniques et institutionnelles, les dommages résiduels seront d'autant plus importants et pourront connaître une phase d'accélération.

Les évaluations des impacts correspondent, nous l'avons vu, à un nouvel état d'équilibre du climat et ne prennent pas en compte les coûts associés à la transition du climat que nous connaissons actuellement vers ce nouveau régime climatique. Cette distinction entre transition et équilibre prend tout son sens en raison de l'existence d'inerties socio-économiques et de la présence d'incertitudes tant sur la dynamique du climat que sur le développement des sociétés, des technologies ou la réponse des écosystèmes.

Le graphique 2, destiné à montrer la très forte inertie des mécanismes à l'œuvre dans le changement climatique, met en évidence les échelles de temps en présence entre la réduction des émissions de GES et l'établissement d'un nouvel équilibre climatique : c'est au moins en siècles qu'il faut compter. S'il est très difficile d'imaginer à quoi pourraient ressembler

les sociétés à des horizons aussi lointains, il est tout à fait légitime d'envisager qu'elles seront adaptées à leur « nouvel » environnement dans l'hypothèse où le climat se stabilise à un nouveau régime et n'est pas entraîné dans des perturbations chaotiques.

2. Effets de flux, effets de stocks



Lecture : La concentration en CO_2 , la température et le niveau des océans continuent à s'accroître bien après que les émissions sont réduites. Une fois les émissions de CO_2 réduites ou stabilisées à un niveau bas, la concentration atmosphérique de CO_2 se stabilise en quelque cent à trois cents ans. Les températures de surface continuent de croître lentement, à l'échelle d'un ou deux siècles. L'expansion thermique des océans se poursuit bien au-delà de la réduction des émissions et la glace de mer continue à contribuer à la hausse du niveau des mers pendant des centaines d'années. Ce graphique est une illustration générale, valable pour tout niveau de stabilisation de la concentration atmosphérique de CO_2 , entre 450 et 1 000 ppm, c'est pourquoi il ne porte aucune indication sur l'axe des ordonnées. Dans cet intervalle de stabilisation, les réponses de l'atmosphère, du cycle du carbone, de l'océan suivent des échéanciers assez similaires.

Source : GIEC/TAR/SR.

C'est donc du côté de la phase de transition qu'il faut tourner le regard pour comprendre comment de la course de vitesse entre changement climatique et action peut naître des non-linéarités. Les termes de ce jeu relatif s'expliquent par l'existence d'inerties socio-économiques et la présence de l'incertitude.

Différentes sources d'inerties socio-économiques pèsent en effet sur la mise en œuvre et l'ajustement des politiques climatiques. Ainsi, en s'intéressant uniquement aux stratégies d'adaptation, si certaines sont relativement rapides à mettre en place, comme l'installation de centrales de climatisation ou des modifications à la marge des pratiques culturelles (dates des

semis, techniques d'irrigation, utilisation de nouvelles variétés plus adaptées, changement des cultures), d'autres en revanche, par exemple une série d'incitations par les compagnies d'assurance pour pousser les assurés à réduire leur exposition et leur vulnérabilité aux risques, la construction d'ouvrages de défense le long du littoral, la planification de l'occupation des sols, ou la mise en place d'un réseau de surveillance météorologique et communication de l'information pour prévenir les effets dévastateurs des événements extrêmes, nécessitent un délai de réaction et un temps d'élaboration beaucoup plus long.

La pertinence et le succès des stratégies d'adaptation dépend essentiellement de trois éléments : se rendre compte de la nécessité de s'adapter (détecter ou prévoir une modification du climat et des facteurs environnementaux), être incité à entreprendre de telles actions et posséder les ressources financières, scientifiques et techniques nécessaires (Fankhauser et *al.*, 1999). Le premier de ces éléments met en lumière l'importance de l'échéancier d'arrivées d'informations exploitables pour planifier à temps les stratégies d'adaptation (et de mitigation). Il s'agit, d'une part, de la réduction graduelle des incertitudes et de notre progression dans la connaissance des mécanismes à l'œuvre dans le changement climatique et, d'autre part, du brouillage que peuvent causer les croyances que nous entretenons sur l'évolution du climat, des systèmes naturels ou de l'économie. En particulier, la variabilité naturelle du climat rend d'autant plus difficile toute tentative de dégager une tendance d'évolution lente du climat au milieu d'un signal très brouillé ; pire, au moment de prendre des orientations de long terme pour planifier des mesures d'adaptation, les agents peuvent être très influencés par des anomalies météorologiques régionales récentes et les interpréter comme la tendance future. Ainsi pour tenir compte de l'effet de masque de la variabilité du climat sur les stratégies d'adaptation dans le secteur agricole, Schneider et *al.* (2001) proposent d'introduire un délai d'une vingtaine d'années entre l'occurrence de premiers signes perceptibles du changement climatique et leur détection par l'exploitant. Les décisions de production sont donc prises avec retard et les résultats obtenus ont le mérite de tempérer les hypothèses très optimistes de clairvoyance parfaite, présentes dans beaucoup d'études d'impacts.

Dès lors, si le changement climatique se traduit pendant cette phase de transition par l'occurrence d'une surprise climatique, de transformations irréversibles de l'environnement ou de chocs sur les économies ou les sociétés, phénomènes non anticipés ou dont la connaissance arrive trop tard, le niveau de dommages résultants connaîtra une croissance soudaine en raison de la saturation des capacités d'adaptation entreprises. En outre, en plus de la perte en bien-être immédiate résultant de la diffusion des impacts au travers des relations entre économie et environnement, le coût de l'accélération des dépenses de réparation et de renforcement de protection contre les effets adverses du changement climatique entraînera un sacrifice momentané supplémentaire de consommation (et éventuellement d'invest-

tissement). Ainsi un changement climatique « trop rapide » affaiblit notablement les capacités d'adaptation et conduit à des actions inappropriées et coûteuses à plus d'un titre. Le niveau de dommages résiduels est en conséquence beaucoup plus élevé qu'en présence d'un changement graduel, permettant en outre de mieux utiliser l'information. Yohe et Schlesinger (1998) ont ainsi étudié les impacts d'une hausse du niveau de la mer le long des côtes des États-Unis pour deux types d'anticipations (anticipation parfaite, myopie). Dans le second cas, une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 1 m peut augmenter le coût des impacts jusqu'à 50 % par rapport à une situation où la hausse du niveau des mers est parfaitement connue et intégrée dans l'aménagement du territoire (et les stratégies d'adaptation).

Dans la plupart des scénarios de changement climatique, le rythme du changement climatique est plus important à court terme qu'à long terme parce que les émissions de GES croissent plus vite au début du XXI^e siècle. Cette tendance est encore plus prononcée dans les exercices de prospective de contrôle des émissions où les efforts sont souvent repoussés dans le temps. Les travaux de modélisation inverse⁽⁶⁾ (*Tolerable Climate Window Approach*, Toth, 1997 et *Safe Corridor Analysis*, Alcamo et al., 1996) montrent ainsi que parmi les contraintes exprimées dans ces travaux, le rythme du changement climatique est une contrainte majeure pendant la première moitié du XXI^e siècle.

3. Règles d'agrégation et jugements de valeur

En plus des appréciations sur l'existence de risques de phases d'accélération dans les dommages provoqués par le réchauffement climatique, leur évaluation globale dépend de façon critique des règles adoptées pour agréger dans le temps et l'espace des coûts de nature si diverse. En effet, on peut avoir à la fois des processus non linéaires à l'échelle locale pendant certaines périodes et une évaluation globale des dommages qui prenne la forme d'une évolution régulière, « sans surprise ». Il convient alors de prêter attention à la signification économique des règles d'agrégation, la difficulté étant qu'elles renvoient à des jugements de valeur tout autant qu'à une stricte évaluation des mécanismes économiques en jeu.

(6) Ces deux techniques d'analyse des politiques climatiques pourraient être caractérisées de méthodes inverses. Dans une première étape, on définit un espace de changement climatique tolérable en circonvenant un certain nombre de variables climatiques ou environnementales dans des intervalles d'admissibilité. Par exemple, la température moyenne globale ne peut pas s'élever de plus de 2° C par rapport à sa valeur de départ, la hausse du niveau des mers ne doit pas dépasser 50 cm sur toute la période d'étude, les écosystèmes de doivent pas régresser de plus de 30 %. Ces contraintes étant données, le modèle recherche dans une seconde étape les profils d'émissions qui permettent de s'y maintenir. Si la *Safe Corridor Approach* s'appuie sur un modèle économique et climatique des plus simples, la *Tolerable Climate Window Approach* consiste en une véritable inversion de modèle intégré sophistiqué. Ces techniques permettent de visualiser l'impact de certaines variables climatiques ou environnementales (comme le rythme du changement climatique) sur les coûts de réduction des émissions.

3.1. Agrégation spatiale et risques d'effet de masque

Nous partirons ici de l'évaluation de Mendelsohn *et al.* (1997) qui conclue à des dommages climatiques représentant 0,3 % du PIB mondial, chiffre bien sûr très faible qui milite pour l'inaction. Or, ce chiffre provient de l'agrégation de dommages très inégalement répartis : les pertes de PIB sont supportées par les pays en développement (jusqu'à 4,7 % pour l'Afrique) et c'est l'agrégation avec les gains dans les pays de l'OCDE qui permet de déboucher sur un chiffre aussi faible.

Ce mécanisme est encore plus clair si on descend à l'échelle sectorielle : les pertes du secteur agricole en Afrique s'élèveraient à 132 milliards et 220 milliards de dollars en Asie, soit de l'ordre de 4,7 et 0,7 % des PIB régionaux. Dès qu'on agrège ces deux seules régions, on obtient une perte de 1 % seulement du PIB agrégé qui ne rend absolument plus compte du très lourd fardeau que supporterait l'Afrique avec de grands risques d'effets en chaîne non linéaires, comme dans l'exemple de l'Ouganda que nous avons déjà commenté. Une perte de 4,7 % du PIB agricole en Afrique indique probablement une croissance des besoins alimentaires non satisfaits mais ce risque disparaît dans toute statistique agrégée en raison du faible poids économique de cette région.

Cette moindre influence des dommages subis par les pays pauvres est bien sûr systématique dans ce type d'agrégation : dans le cas des dégâts infligés par le cyclone Mitch (2001) en Amérique centrale et aux États-Unis, les dommages subis par les populations des zones les moins développées (décès, destruction des habitations et des infrastructures, problèmes sanitaires) sont, en pourcentage, beaucoup plus importants qu'en Amérique du Nord. Cependant ils pèsent beaucoup moins lourd que ces derniers dans une simple sommation des pertes : la valeur des équipements détruits y est moindre, de même, calcul fort controversé, que celle des pertes en vies humaines (*Statistical Value of Life*)⁽⁷⁾.

Les solutions suggérées pour contourner cette difficulté ont le mérite de communiquer une information plus complète aux décideurs par le recours à une pluralité d'indicateurs comme la monnaie, les pertes en vies humaines, et des indices de qualité de vie (coût psychologique de la disparition du patrimoine naturel, des migrations), de diversité spécifique et de répartition des impacts (Schneider *et al.*, 2000). Mais, en dehors des difficultés de leur construction, elles ne répondent pas aux deux problèmes de fonds posés dans toute agrégation des dommages.

(7) On peut être légitimement choqué par le fait qu'une vie perdue ou sauvée ne représente pas la même valeur selon qu'il s'agit d'un habitant d'une région développée ou moins avancée. Ceci a donné lieu à des débats vifs lors de la publication du deuxième rapport du GIEC (Hourcade, 1996) qui proviennent de la confusion entre valeur économique et valeur morale. Il ne serait pas pertinent de les reprendre ici et on s'en tiendra au constat que, en termes de « valeur économique » détruite, une inondation dans le midi de la France pèse plus qu'au Guatemala.

3.1.1. L'hypothèse (improbable ?) de mécanismes de compensation

Le premier problème vient de ce que, du strict point de vue d'une analyse économique correctement menée, toute sommation des gains et pertes du changement climatique n'est légitime que si on fait l'hypothèse de compensations entre gagnants et perdants (principe de Hicks-Kaldor). En pratique, on peut se contenter de dire, toujours à partir des résultats de Mendelsohn et *al.* (1999), que les dommages climatiques ne représentent que – 0,3 % du revenu mondial uniquement sous l'hypothèse que les pays bénéficiaires (l'OCDE pour un montant de 0,1 % de leur PIB) compenseront les pays vulnérables. Sinon, il faut s'interroger sur les impacts plus importants d'une perte effective de richesse plus importante sur ces derniers. Pour donner une idée plus concrète de ce qui est en jeu derrière ces chiffres globaux, à la fois fragiles et quelque peu abstraits, on peut prendre l'exemple de la malaria ou de la submersion de parties importantes du Bangladesh sous l'effet de la montée des océans : on peut en effet estimer que, s'ils étaient engagés à compenser les pays ainsi affectés, les pays du Nord financeraient à temps des programmes de vaccination à grande échelle ou construiraient les ouvrages de défense appropriés pour protéger les habitants du Delta du Gange.

Le problème bien sûr est celui de la crédibilité de tels mécanismes de compensation *ex post* (ou de prévention *ex ante*). Pour s'en tenir aux chiffres de Mendelsohn, les flux financiers Nord-Sud nécessaires représenteraient un montant comparable à celui de l'aide publique au développement des 22 pays membres du Comité d'aide au développement de l'OCDE – soit en 2000, 53,7 milliards de dollars (OCDE, 2001) ; déjà peu envisageables en l'état, de tels transferts deviendraient vite irréalistes en cas de dommages supérieurs.

Une évaluation réaliste des dommages collectifs requiert donc d'examiner ce qui se passerait en cas de non-compensation entre gagnants et perdants. En toute rigueur, ce sont les utilités qui devraient être sommées et non les PIB ; or si elle correspond, dans certaines régions, à la mise en cause des besoins fondamentaux des populations (eau, alimentation), une même perte de valeur y aura un impact sur le bien-être nettement supérieur que dans une région riche. De plus l'aversion au risque que l'on devrait prendre pour ces populations dans tout raisonnement normatif devrait être supérieure même si, en pratique elles n'ont pas les moyens économiques de s'assurer ou de procéder à des investissements de précaution. Ce seul fait devrait conduire à réévaluer à la hausse toute agrégation simple des pertes en PIB. Mais la réévaluation la plus importante vient de la prise en compte des implications des dommages sur les populations les plus vulnérables en cas de non-compensation ou d'absence d'aide à l'adaptation.

On montre d'ailleurs, en repartant des estimations de Mendelsohn et *al.* (1997), qu'adopter une règle d'agrégation des utilités entre régions de type « un homme-une voix » conduit à réévaluer nettement le dommage résultant à l'échelle mondiale par rapport à une règle d'agrégation qui suit la

distribution observée du revenu entre régions (type Negishi). Dans les deux situations, le calcul prend pourtant bien en compte les différences d'utilité marginale du revenu d'une région à l'autre (et est à même de traduire qu'une perte du revenu régional de 1,5 % n'induit pas la même perte d'utilité selon qu'il s'agit d'une région développée ou moins avancée) mais la règle d'agrégation l'emporte. Par exemple, dans le cas où l'on retient une fonction d'utilité de type logarithme népérien, on obtient, quand on suit la règle « un homme, un vote », un dommage résultant à l'échelle mondiale correspondant à une perte de 2,77 % du PIB mondial tandis que pour une règle de type Negishi, le dommage résultant à l'échelle mondiale correspond à une perte de 1,20 % du PIB mondial (soit moins de la moitié de la valeur précédente). En étudiant le montant des transferts entre « gagnants » et « perdants », on peut constater que l'effet des pondérations est de majoritairement renforcer le poids des régions vulnérables en regard du poids des régions bénéficiaires. Les pertes en bien-être varient en effet du simple ou double tandis que les gains en bien-être diminuent du tiers ; les transferts consentis des « gagnants » vers les « perdants » restent en revanche à peu près constants : de l'ordre de 0,35 % du PIB des régions bénéficiaires (Ambrosi, Hourcade et LeTreut, 2002).

3.1.2. La non prise en compte des phénomènes de propagation

En l'absence de mécanismes de compensation, l'occurrence de phases de dommages accélérés peut induire des chocs se propageant dans les circuits économiques et tissus sociaux et qui peuvent soit s'atténuer soit s'amplifier. C'est donc la géographie des « gagnants » et des « perdants » qui peut se trouver profondément affectée par rapport à une analyse qui tiendrait compte des seuls impacts directs.

La configuration qui revient fréquemment dans la littérature est celle des conflits locaux et phénomènes migratoires (*climate change refugees*) attisés par des ruptures locales accélérées par le changement climatique. La rareté croissante de l'eau et la désertification sont un déclencheur évident de ce type de mécanisme ; par exemple, le rapport Deneux (2001) montre que les disponibilités en eau risquent de descendre en dessous du seuil de pénurie (500 m³/hab/an) dès 2025 dans cinq États du sud et de l'est de la Méditerranée en 2025 et dans huit en 2050. Or ceci se produirait dans un contexte où les tensions pour l'accès à l'eau sont déjà fortes entre États et où l'explosion démographique conduit à des conflits croissants pour l'usage de l'eau entre centres urbains et activités agricoles. D'autres configurations de pressions migratoires peuvent être provoquées par l'augmentation du niveau des mers, depuis le Bangladesh jusqu'aux petites îles de l'Océan Pacifique. Ainsi, le Premier ministre de Tuvalu a annoncé en 2000 « *Tuvaluans are seeking a place they can permanently migrate to should the high tides eventually make our homes uninhabitable* » (Barnett, 2001).

Mais on peut songer bien sûr à d'autres configurations moins spectaculaires (impact de la fermeture des sports d'hivers dans certaines vallées) ou

de configurations intermédiaires comme l'aggravation de problèmes de solidarité nationale entre le nord et le sud de l'Italie ou l'Espagne, ou de solidarité européenne en cas de transferts trop fortement croissants.

Cette prise en compte de la propagation des chocs peut transformer sensiblement l'ordre de grandeur des dommages. Une critique souvent faite aux calculs agrégés est qu'ils entérinent la distribution actuelle des revenus en donnant de fait un moindre poids aux populations pauvres. En toute rigueur, on peut certes corriger ces calculs de façon normative en choisissant une pondération « un homme-une voix » mais on peut douter que le résultat obtenu corresponde à une situation politique envisageable à courte échéance. En revanche, la prise en compte des risques de propagation conduit à des résultats similaires pour des raisons non plus d'éthique altruiste mais d'intérêts bien compris. En d'autres termes, personne ne serait gagnant au changement climatique si les effets en retour des dommages subis par les pays vulnérables sur les pays peu affectés par les coûts directs s'avéraient très importants.

3.2. Les effets d'optique de l'agrégation temporelle

Il existe un deuxième biais méthodologique important dans la présentation des chiffres d'impact agrégés, leur agrégation temporelle. Bien souvent, les modèles intégrés comparent coûts d'abattement et dommages en les agrégeant sur un siècle. On ignore ainsi totalement le fait qu'en cas de chocs concentrés dans le temps, les pertes de bien-être peuvent être bien supérieures aux pertes de PIB et doivent être valorisées comme telles. Pour prendre un exemple frappant de l'écart entre raisonnement en « bien-être » et raisonnement en PIB agrégé, il suffit de constater que la perte économique provoquée en France par la Première Guerre mondiale sur l'économie française et mesurée comme la différence entre un scénario de croissance potentielle et les observations n'est que de 14 % (Maddison, 1995)⁽⁸⁾ (recul qui s'étend de 1916 à 1923 avec choc brutal puis rattrapage sur quelques années). Ceci représente une perte de croissance de 2 % sur 70 ans et un coût actualisé de 1,2 % du PIB actualisé. Un tel calcul, qui conduit à des ordres de grandeurs équivalents à ceux des quelques études existantes sur le climat, écrase le coût humain, concentré sur une génération, de cette grande crise mondiale et néglige les effets de long terme induits par ce choc.

On notera que ce problème d'agrégation n'est pas dû à la technique de l'actualisation mais bien à l'écart entre évaluation en PIB et évaluation en « bien-être » et que l'on tient compte des risques de chocs, de même que de

(8) Les séries reconstituées par Maddison donnent le PIB, c'est-à-dire le revenu généré en un an par un pays, mais pas d'estimation de la richesse de ce même pays. Dans notre exemple, les pertes économiques de la guerre sont donc sous-estimées parce qu'elles n'incluent pas les pertes en bien capital. Pour reprendre la distinction entre impacts et dommages, nous avons là une mesure incomplète des impacts (il manque les coûts en capital, entre autres) mais certainement pas des dommages (les coûts psychologiques ne sont pas représentés).

leurs effets potentiels sur les trajectoires de croissance. Certes la valorisation de ces risques dépend en dernière instance de jugements de valeur et on peut choisir de les ignorer, mais il convient de le faire en toute connaissance de cause et non en raison d'une lecture naïve d'un chiffre apparemment simple.

Conclusion : les dangers du discours sur les dommages

L'itinéraire suivi dans ce complément laissera insatisfait le lecteur qui attendait une réponse définitive sur l'évaluation des dommages climatiques induits par les activités humaines. C'est que l'exploration systématique des fonctions de réponse entre environnement, économie et société est un effort qui vient de démarrer ; elle implique de coupler une large gamme de scénarios économiques et de scénarios climatiques pour identifier les sources potentielles de non-linéarités, et ne pourra déboucher sur des diagnostics fiables qu'en mobilisant des disciplines très variées autour d'un langage suffisamment commun.

Nous avons fait apparaître les déterminants potentiels de ces dommages et montré que c'est bien au croisement entre incertitudes et inerties des systèmes naturels et humains que tout se joue. C'est pourquoi les images utilisées dans des magazines voulant marquer une saine distance critique par rapport au catastrophisme sont trompeuses : la remontée du climat de Biarritz à Deauville n'est pas un coût si et seulement si on est sûr que cela n'implique pas des tempêtes répétées interdisant la régénérescence de la forêt landaise, ou une Provence en voie de désertification avec des difficultés pour trouver aux habitants de la Côte d'Azur des activités de substitution à un tourisme moins attractif, ou enfin la nécessité d'accueillir des populations fuyant une Italie ou une Espagne du Sud rendues inhospitalières. De même, la vision d'une Sibérie couverte de blé ne tient pas compte des catastrophes induites par le dégel du permafrost. Il convient de se méfier de ces images qui nous projettent dans un univers avec un nouveau climat stabilisé et ignorent que l'enjeu est celui de la transition d'un régime à l'autre et des incertitudes tout au long de ce chemin.

Nous avons aussi attiré l'attention sur les risques du raisonnement qui ne tiendrait pas compte de possibles effets de seuils dans les dommages ni des incertitudes sur la sensibilité climatique ni des non-linéarités dans les coûts sociaux pour les populations affectées dans leurs besoins fondamentaux, ferait l'hypothèse systématique de la présence de mécanismes de compensation ou ignorerait le caractère difficilement assurable de certains impacts et les mécanismes de propagation de dommages régionaux.

À cela se rajoutent deux questions : celle de la *preuve* et du *signal* climatique, c'est-à-dire du moment où la répétition de tel événement extrême ou de tel niveau de fonte des glaces polaires sera interprété comme un précurseur de dérèglements graves ; celle de *l'attribution* d'un pourcentage

donné d'un impact et d'un dommage au changement climatique (et comme c'est la tentation dans certains milieux, de chercher à établir des responsabilités dans une interprétation risquée du principe pollueur-payeur), sachant que, dans bien des cas, celui-ci intervient en facteur aggravant de déséquilibres préexistants.

En fait, tant que la « science des dommages » fournit des diagnostics moins assurés que celle du climat, on peut aujourd'hui très légitimement penser que les dommages croîtront à un rythme suffisamment lent et que des mécanismes d'adaptation, d'assurance ou de compensation pourront être mis en place à temps mais on peut tout aussi légitimement envisager la plausibilité de phénomènes explosifs conduisant à des chocs économiques significatifs ou à un accroissement si important de la variabilité que le climat deviendra plus qu'aujourd'hui une source d'incertitude pour la décision économique.

Cette difficulté n'implique pas l'inaction puisque, en raison de l'inertie des systèmes naturels et humains, des preuves ou un signal crédible pourraient venir trop tard. Hourcade et Lecocq (complément D) expliquent que dans un tel contexte, une approche séquentielle à la décision est la seule réponse rationnelle qui permette à la fois de concilier les diverses « croyances » et de préserver des capacités d'adaptation en fonction d'informations nouvelles.

Cependant nous voulons ici insister sur les implications du mode de traitement des incertitudes sur les dommages pour le processus de négociation lui-même. Soit on se contente de l'alerte scientifiquement plus robuste sur un réchauffement important dans un laps de temps relativement bref et la négociation se noue entre visions plus ou moins pessimistes des risques attachés à tel ou tel plafond de concentration. Soit on demande plus d'informations sur la nature des risques et on est alors renvoyé à un agenda de recherche de longue durée. Le risque est alors, vu l'absence de bases scientifiques stabilisées, de lancer un *regressum ad infinitum* de controverses risquant de paralyser la négociation. Un des risques majeurs est alors le raisonnement en termes de régions « gagnantes » et « perdantes » : on peut en effet tirer d'une telle distinction l'idée que c'est aux régions « perdantes » de financer les efforts de prévention des risques alors même que ces régions, qui sont les plus pauvres, n'ont pas les moyens d'un tel financement. Or une telle attitude n'est pas cohérente avec le voile de l'ignorance dans lequel nous resterons encore longtemps en matière de régionalisation des impacts et de risques de propagation de chocs locaux. C'est pourquoi, une attitude de solidarité universelle peut alors être la seule cohérente avec une prise sérieuse du principe de précaution en ces matières et une condition nécessaire pour un accord international viable.

Références bibliographiques

- Acacia (2000) : « Assessment of Potential Effects and Adaptations for Climate Change » in *Europe: The Europe Acacia Project*, Parry (ed.), Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich.
- Alcamo J.E. et Kreileman (1996) : « Emission Scenarios and Global Climate Protection », *Global Environmental Change*, vol. 6, n° 4, pp. 305-333.
- Ambrosi P., J-C. Hourcade et H. LeTreut (2002) : « Spatialisation des dommages et incertitude : primes de risques régionales et agrégation » in *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution*, Hourcade et LeTreut (dir.), rapport final, Programme GICC (ADEME/MATE/MIES).
- Barnett J. (2001) : « Security and Climate Change », *Tyndall Centre Working Paper*, n° 7, octobre. Disponible sur www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/working_papers.html
- Barnett J. et W.N. Adger (2001) : « Climate Dangers and Atoll Countries », *Tyndall Centre Working Paper*, n° 9, octobre. Disponible sur www.tyndall.ac.uk/publications/working_papers/working_papers.html
- Beniston M. (2000) : *Impacts potentiels sur l'environnement alpin au XXI^e siècle*, communication au colloque 'Les changements climatiques et leurs incidences sur le milieu montagnard', Chamonix, 29-30 juin.
- Bryant et al. (1998) : « Reefs at Risk: A Map-Based Indicator of Threats to the World's Coral Reefs », World Resources Institute, WRI/ICLARM/WCMC/UNEP, Washington, DC. 56 p. Disponible sur www.wri.org/wri/indictrs/reefrisk.htm
- Deneux M. (2002) : « L'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100 », Rapport d'information 224 (tomes I et II), *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, Sénat, Paris.
- Dumas P. et M. Ha Duong (2002) : « La fonction d'impact dans l'analyse coût-bénéfice de changement climatique » in *Modélisation intégrée, évaluation des risques climatiques et des politiques de précaution*, Hourcade et LeTreut (dir.), Rapport final, Programme GICC (ADEME/MATE/MIES).
- Easterling D. et al. (2000) : « Climate Extremes: Observations, Modeling and Impacts », *Science*, vol. 298, pp. 2068-2074, septembre.
- Fankhauser S. (1994) : « The Economic Costs of Climate Change », *Global Environmental Change*, vol. 4, n° 4, pp. 301-309.

- Fankhauser S. et al. (1999) : « Weathering Climate Change: Some Simple Rules to Guide Adaptation Decisions », *Ecological Economics*, 30, pp. 67-78.
- FAOSTAT (2001) : *Base de données FAO*, Organisation de l'agriculture et de l'alimentation, Rome, Italie. Disponible sur www.fao.org
- FFSA (Fédération française des sociétés d'assurance) (2000) : *Assurer*, 118, 11 décembre.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2001) : « Climate Change 2001: The Scientific Basis », Contribution au groupe de travail I, GIEC/TAR/WGI, *Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, Ding, Griggs, Noguer, van der Linden, Dai, Maskell et Johnson (eds), Cambridge University Press.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2001) : « Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability », Contribution au groupe de travail II, GIEC/TAR/WGII, *Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, McCarthy, Canziani, Leary, Dokken et White (eds), Cambridge University Press.
- GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2001) : *Climate Change 2001: Synthesis Report*, GIEC/TAR/SR, Cambridge University Press.
- Hoegh-Guldberg O. et al. (2000) : *Pacific in Peril: Biological, Economic and Social Impacts of Climate Change on Pacific Coral Reefs*, Greenpeace, Amsterdam.
- Hourcade J-C. et T. Chapuis (1995) : « No Regret Potentials and Technical Innovation: A Viability Approach to Integrated Assessment of Climate Policies », *Energy Policy*, vol. 23, n° 4/5, pp. 433-445.
- Hourcade J-C. (1996) : « Consensus inespéré ou artefact rhétorique ? », *Les Cahiers de Global Chance*, n° 7, pp. 63-72, juillet.
- Kelly D. et al. (1999) : « Integrated Assessment Models for Climate Change Control », chapitre 4 in *The International Yearbook of Environmental and Resource Economics 1999/2000*, Folmer et Tietenberg (eds), Cheltenham, pp. 171-197.
- Maddison A. (1995) : *L'économie mondiale 1820-1992 : analyse et statistiques*, OCDE, Paris, 274 p., 2^e éd. 1998.
- Manabe S. et R. Stouffer (1993) : « Century-Scale Effects of Increased Atmospheric CO₂ on the Ocean Atmosphere System », *Nature*, vol. 364, pp. 215-218.
- Martin E. (2000) : « Modification de la couche neigeuse » in *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle*, Mousel et Lesaffre (eds), Mission interministérielle sur l'effet de serre, 2^e édition.

- Mastrandrea M.D. et S. Schneider (2001) : « Integrated Assessment of Abrupt Climate Changes », *Climate Policy*, 1, pp. 433-449.
- Mendelsohn R. et al. (2000) : « Country-Specific Market Impacts of Climate Change », *Climatic Change*, 45, pp. 553-569.
- Mendelsohn R. et al. (1997): « Country-Specific Market Impacts of Climate Change », Yale University (New Haven) et University of Urbana Champaign. Disponible sur http://crga.atmos.uiuc.edu/publications/market_impact/text.html.
- Munich Re (1999) : « Annual Review of Natural Catastrophes 1998 », *Topics*, Munich.
- Munich Re (2000) : *World of Natural Hazards* (cédérom), Munich.
- The National Academies (2002) : *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*, Committee on Abrupt Climate Change, Ocean Studies Board, Polar Research Board, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Division on Earth and Life Studies, the National Academies, National Academy Press, Washington DC.
- Nicholls R.J. et al. (1999) : « Increasing Flood Risk and Wetland Losses Due to Global Sea-Level Rise: Regional and Global Analysis », *Global Environmental Change*, vol. 9, Special Issue 'A New Assessment of the Global Effects of Climate Change', Parry (ed.), pp. 69-87, décembre.
- Nordhaus W. et al. (2000) : *Warming the World : Economic Models of Climate Change*, MIT Press, Cambridge (MA).
- Nordhaus W. et al. (1996) : « RICE: A Regional Dynamic General Equilibrium Model of Optimal Climate-Change Policy », *American Economic Review*, 86(4), pp. 741-765.
- Nordhaus W. (1994a) : « Expert Opinion on Climatic Change », *American Scientist*, 82, pp. 45-52.
- Nordhaus W. (1994b) : *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge (MA).
- Palmer T.N. et J. Räisänen (2002) : « Quantifying the Risk of Extreme Seasonal Precipitation Events in a Changing Climate », *Nature*, 415, pp. 512-514, 31 janvier.
- Parry M. (1999) : « New Estimates of Climate Change Impacts », *Global Environmental Change*, Special Issue 'A New Assessment of the Global effects of Climate Change', Parry (ed.), décembre.
- Parry M. et al. (2001) : « Millions at Risk: Defining Critical Climate Change Threats and Targets », *Global Environmental Change*, 11, pp. 181-183.
- Peck S. et T. Teisberg (1993) : « The Importance of Nonlinearities in Global Warming Damage Costs » in *Assessing Surprises and Nonlinearities in Greenhouse Warming*, Darmstadter et Toman (eds), Resources for the Future, Washington DC, mai.

- Rahmstorf S. (2002) : « Ocean Circulation and Climate During the Past 120,000 Years », *Nature*, vol. 419, pp. 207-214, 12 septembre.
- Rahmstorf S. et al. (1999) : « Long Term Global Warming Scenarios Computed with an Efficient Coupled Climate Model », *Climatic Change*.
- Roughgarden T. et al. (1999). « Climate Change Policy: Quantifying Uncertainties for Damages and Optimal Carbon Taxes », *Energy Policy*, 27, pp. 415-429.
- Schneider S. et al. (2001) : « Integrated Assessment Models of Climate Change: Beyond a Doubling of CO₂ » in *The Long-Term Economics of Climate Change: Beyond a Doubling of Greenhouse Gas Concentrations*, Hall et Howarth (eds), Amsterdam, Elsevier.
- Schneider S.H., K.K. Duriseti et C. Azar (2000) : « Costing Nonlinearities, Surprises and Irreversible Events », *Pacific and Asian Journal of Energy*, 10 (1), pp. 81-91
- Schneider S. et S.L. Thompson (2000b) : « A Simple Climate Model Used in Economic Studies of Global Change » in *New Directions in the Economics and Integrated Assessment of Global Climate Change*, DeCanio, Howarth, Sanstad, Schneider et Thompson (eds), Pew Center, octobre.
- Simonett O. (1989) : « Potential Impacts of Global Warming », *Case Studies on Climatic Change*, GRID-Geneva, Genève.
- Spalding M.D. et al. (2001) : *World Atlas of Coral Reefs*, University of California Press, Berkeley.
- Tol R.S.J. (1999) : « New Estimates of the Damage Costs of Climate Change », part. I et II, *IVM Working Paper*, D99-01 et 02, Vrije Universiteit Amsterdam.
- Tol R.S.J. (1995) : « The Damage Costs of Climate Change: Toward More Comprehensive Calculations », *Environmental and Resource Economics*, 5, pp. 353-374.
- Toth F. et al. (1997) : « The Tolerable Climate Window Approach to Integrated Assessment » in *Climate Change and Integrated Assessment Models: Bridging the Gap*, IPCC Proceedings, mars.
- UNFCCC (1992) : *Convention-cadre sur les changements climatiques*.
Disponible sur www.unfccc.de
- Weiss H. et R.S. Bradley (2001) : « What Drives Societal Collapse? », *Science*, pp. 609-610, 26 janvier.
- Weller G. et M. Lange (1999) : *Impacts of Global Climate Change in the Arctic Regions*, International Arctic Science Committee, Centre for Global Change and Arctic System Research, University of Alaska, Fairbanks, AK.
- World Bank (2000) : *Cities, Sea and Storms: Managing Change in Pacific Island Economies*, World Bank, Washington DC.
- World Development Indicators Database (2001) : *The World Bank Group*, avril. Disponible sur www.worldbank.org

Complément C

Les coûts des politiques climatiques

Patrick Criqui

*Institut économique et politique de l'énergie (IEPE),
CNRS-Université de Grenoble*

Marc Vielle

Commissariat à l'énergie atomique, Toulouse

Laurent Viguié

Université de Genève

Dans une économie prenant en compte l'environnement, la maximisation du bien-être impose, en théorie, de comparer les coûts associés aux pollutions et les coûts des politiques visant à leur réduction. L'analyse coût-avantages (ACA) permet alors de définir un « optimum de pollution », là où le coût marginal de la réduction est égal au coût marginal du dommage. En fait, et malgré les progrès réels des techniques d'évaluation et de monétarisation des dommages, il est dans de nombreux domaines difficile de construire une évaluation marchande des biens collectifs environnementaux.

Tel est le cas du changement climatique, car les modèles climatiques les plus avancés ne présentent pas – du moins pas encore – de valeur prédictive pour les échelles spatiales pertinentes en termes d'évaluation des impacts économiques. Cela n'empêche pas certains économistes de tenter l'exercice, avec des modèles rigoureux, mais synthétiques (voir dans ce domaine l'ensemble des travaux pionniers de Nordhaus et le complément B de Ambrosi et Hourcade). Les résultats indiquent alors le plus souvent la nécessité d'une action, mais d'une action modeste, puisqu'elle correspond à un « consentement à payer » pour la réduction des émissions de l'ordre de 30 euros par tonne de carbone (soit environ 3 euros pour un baril de pétrole).

En fait, la plus grande partie des travaux économiques menés ces dernières années sur les politiques climatiques prennent les objectifs d'émiss-

sion comme une donnée exogène, supposée découler d'une décision politique informée par les sciences de la nature. La position de l'économiste est alors plus modeste puisqu'il ne s'agit plus de décider des objectifs eux-mêmes, mais d'explorer les voies des politiques, du point de vue de l'efficacité économique. Le cadre du Protocole de Kyoto impose d'ailleurs ce type d'approche coût-efficacité (ACE) puisque les objectifs ont été négociés par les États, d'abord dans l'esprit de ce qui apparaissait à un moment acceptable mais sur des bases scientifiques ou économiques encore floues. On peut noter que les résultats obtenus dans l'ACE indiquent généralement un consentement à payer implicite beaucoup plus élevé que dans l'ACA, en ordre de grandeur 4 à 5 fois plus élevé.

Dans ce qui suit nous présenterons dans un premier temps les types de modèle utilisés pour les évaluations économiques des politiques climatiques, avant d'analyser quelques uns des résultats-clés de ces évaluations d'abord pour l'horizon de la « première période d'engagement » du Protocole de Kyoto (2008-2012), puis pour des scénarios portant sur un horizon plus éloigné (2030 ou 2040).

1. Modélisation et évaluation des coûts des politiques climatiques

Les émissions futures et les coûts des politiques climatiques peuvent être évalués à partir de différents types de modèles. On distingue en particulier les modèles « technico-économiques » (ou « *bottom-up* ») et les modèles « macroéconomiques » (ou « *top-down* »). Les premiers fournissent une représentation détaillée du système énergétique et des options technologiques, mais ne réalisent pas de bouclage macroéconomique. Les seconds offrent un cadre de cohérence global macro-sectoriel permettant d'appréhender les interactions entre le secteur énergétique et le reste de l'économie. Cette taxonomie a toutefois ses limites puisqu'on compte parmi les modèles existant un nombre de plus en plus grand de modèles « hybrides » qui tendent à réduire le fossé qui sépare traditionnellement les deux paradigmes. On peut alors développer des typologies plus fines, en distinguant, d'une part, le paradigme sur lequel est fondée la modélisation et, d'autre part, la manière dont sont traités les technologies et le secteur énergétique (tableau 1).

L'utilisation des modèles pour l'évaluation des politiques de lutte contre le changement climatique pose d'abord la question de la mesure du coût. Les politiques envisagées sont suffisamment importantes pour que les coûts directs ne représentent pas nécessairement les coûts sociaux – ou coûts pour l'ensemble de l'économie. L'objet de cette section est de tenter d'expliquer les différences dans les résultats selon les modèles et de construire ainsi des ponts entre les multiples voies de l'évaluation économique des politiques climatiques.

1. Une typologie des modèles

Paradigmes économiques	Modélisation énergie/carbone			
	Technologies de la demande énergétique	Technologies de l'offre et de la demande énergétiques	Énergie et technologies dans les fonctions de production	Coefficients du carbone (*)
Simulation et projection	• MEDEE-ME			
Optimisation sectorielle		<ul style="list-style-type: none"> • MARKAL • ETA • EFOM 		
Équilibre partiel		<ul style="list-style-type: none"> • POLES • PRIMES 		
Modèles de croissance optimale (type Ramsey)		<ul style="list-style-type: none"> • MARKAL-macro • ETA-macro • MERGE • CETA • GRAPE 		<ul style="list-style-type: none"> • FUND • RICE • DICE • ICLIPS
Équilibre général calculable, multisectoriel		<ul style="list-style-type: none"> • GTEM • AIM • MS-MRT • SGM 	<ul style="list-style-type: none"> • EPPA • WorldScan • GEMINI-E3 • GREEN • GEM-E3 • G-Cubed 	
Macro-économétrie multisectoriel			<ul style="list-style-type: none"> • Oxford • HERMES • NEMESIS 	

Note : (*) L'énergie et le carbone ne sont pas explicitement représentés dans la fonction de production agrégée mais simplement introduits par le biais d'un indicateur d'intensité énergétique de la production supposé décroître, d'une part, de façon exogène au cours du temps et, d'autre part, sous l'effet des politiques de réduction des émissions.

Source : Auteurs.

1.1. La mesure du coût direct : la valeur du carbone

La valeur du carbone, c'est-à-dire la taxe ou le prix du permis négociable dans le cas d'un marché de permis représente le premier type de mesure proposée par les modèles. C'est celle retenue par les modèles d'équilibre sectoriel et on parle alors de *coût technique* ou *coût sectoriel*. Celui-ci re-

couvre essentiellement le coût des réductions de consommation imposées par la taxe au consommateur final ainsi que celui des substitutions de technologies induites dans les industries énergétiques. On sait que dans une économie « de premier rang » la taxe est effectivement égale au coût marginal de réduction et dès lors le calcul de l'intégrale de la courbe de la taxe jusqu'à l'objectif de réduction donne une évaluation du coût de mise en œuvre de la politique évaluée.

Cependant l'économie est rarement de premier rang, et la prise en compte de la fiscalité existante peut conduire à modifier cette première évaluation pour deux raisons principales. D'abord les taxes interagissent entre elles et la mise en place d'une taxe sur le carbone peut conduire à exacerber ces distorsions, augmentant ainsi le coût de mise en œuvre de la politique ou la diminuant parfois⁽¹⁾. Le coût social ne se limite alors plus seulement à la mesure du coût direct et on ne trouve bien sûr plus l'égalité entre taxe et coût marginal d'abattement. Ensuite les recettes d'une taxe carbone – s'il s'agit d'une taxe dissuasive et non « de financement » – sont suffisamment importantes pour que leur utilisation en substitution à d'autres taxes entraîne des bénéfices susceptibles de minorer le coût direct de mise en œuvre.

1.2. La prise en compte des distorsions fiscales

L'évaluation des distorsions fiscales au sein de l'économie n'est pas chose aisée. Considérons la fiscalité sur les carburants, qui répond à la prise en compte du service lié à l'usage des infrastructures et la prise en compte d'externalités environnementales. Les modèles d'équilibre partiel ne prendront pas en compte la part des distorsions liées à une telle fiscalité ; les modèles d'équilibre général supposeront par défaut que l'ensemble de la fiscalité engendre des distorsions. On obtient alors des bornes supérieure et inférieure du coût intégrant ces distorsions fiscales. L'évaluation de coût avec distorsions est en pratique réalisée par un calcul de surplus, seule mesure pertinente dans ce cas, possible dans les modèles d'équilibre général du fait d'une représentation de l'utilité des consommateurs.

1.3. Le recyclage des recettes issues de la taxe sur le carbone

L'utilisation des recettes créées par la taxation du carbone constitue là aussi une source de bénéfices ou de pertes devant être intégrée au coût direct de la taxation. Une première solution consiste à supposer un recyclage de ces sommes par des transferts forfaitaires aux ménages (*lump sum transfer* dans la terminologie anglo-saxonne). L'autre solution consiste à tenter de choisir un mode de redistribution permettant d'amoinrir le coût

(1) C'est le cas des pays au sein desquels l'énergie est fortement subventionnée. La mise en place d'une taxation sur le carbone peut conduire alors à diminuer le coût de cette taxation génératrice de distorsions, et ainsi diminuer le coût direct de la taxation sur le carbone. Un tel résultat est obtenu pour l'ex-Union soviétique dans le modèle GEMINI-E3 (Bernard et Vielle, 2000).

direct initial. S'ensuit alors l'ensemble des recherches sur le « double dividende », c'est-à-dire sur les gains macroéconomiques éventuellement associés aux politiques de protection de l'environnement.

Cette dimension ne peut être évaluée qu'avec un modèle bouclé c'est-à-dire intégrant le secteur de l'énergie au reste de l'économie. La mesure retenue pour prendre en compte l'impact de cette redistribution devrait être ici encore l'utilité du consommateur et son évaluation monétaire le surplus. Pourtant beaucoup d'évaluations quantitatives utilisent l'approximation que constitue la variation du PIB. C'est le cas bien souvent des études dont les fondements se rattachent à la tradition néo-kéynesienne et dont l'objectif poursuivi est l'augmentation de l'emploi qui se traduit par un PIB plus élevé.

1.4. Les gains ou pertes liés aux termes de l'échange

Un autre élément indirect du coût a trait aux termes de l'échange. Dans une économie ouverte la politique mise en place par un pays peut en effet affecter les autres économies et modifier l'équilibre mondial qui en retour aura un impact sur le coût interne de la politique mise en œuvre. La portée de ces *feedbacks* dépend bien évidemment de l'importance du ou des pays qui mettent en œuvre la politique analysée. L'analyse de ces effets montre que ceux-ci ne sont pas négligeables dans le cas du Protocole de Kyoto⁽²⁾. Ces gains ou pertes liés aux termes de l'échange transitent par la modification des prix relatifs sur les marchés internationaux et plus précisément sur les marchés énergétiques. En effet, la contraction de la demande d'énergie fossile de la part des pays dits de l'Annexe B (pays ayant des engagements quantitatifs dans le cadre de Kyoto) se traduit généralement par une baisse des prix de l'énergie qui bénéficie aux importateurs nets d'énergie.

1.5. Le bénéfice environnemental

L'ultime composante du bien-être devrait bien évidemment reposer sur le gain environnemental issu de moindres émissions de gaz à effet de serre. En pratique très peu de modèles intègrent cette composante. La raison est d'abord la grande incertitude sur les effets du changement climatique et ensuite leur évaluation monétaire. Des tentatives existent notamment au sein de modèles dits intégrés qui associent à la description de l'économie une description simplifiée du climat. Parmi ceux-ci figurent les modèles DICE et RICE dont la fonction d'objectif des consommateurs intègre ainsi cette dimension environnementale. Du fait des caractéristiques temporelles du changement climatique, ces modèles se doivent d'atteindre des horizons lointains (au moins 2100) ce qui les rend difficilement comparables aux modèles de court-moyen terme.

(2) C'est ce que montre le modèle GEMINI-E3 pour la France : les gains des termes de l'échange sont à des niveaux comparables au coût interne de la taxation dans la première période d'engagement (2008-2012).

1.6. Une évaluation des composantes du coût de réduction

Il peut être intéressant de chercher à évaluer l'importance de ces diverses composantes. Bien évidemment ce travail ne peut être réalisé que dans le cas de modèles bouclés qui intègrent tous ces éléments. Cela n'empêche pas cependant de comparer les résultats obtenus au coût direct des modèles d'équilibre sectoriel. Les tableaux 2a et b proposent en exemple cette comparaison pour l'application du Protocole de Kyoto et pour deux pays (les États-Unis et la France), à l'aide de trois modèles (EPPA, GEMINI-E3 et POLES).

2. Décomposition du coût de mise en œuvre du Protocole de Kyoto sans mécanisme de flexibilité en 2010

a. États-Unis

	EPPA	GEMINI-E3	POLES
Baisse d'émission (MtC)	540	517	476
Baisse d'émission (par rapport à la base 2010)	- 29,8 %	- 28,9 %	- 27,7 %
Taxe sur le carbone (\$95)	229	161	145
Coût direct (Mds\$95)	- 45	- 30,7	- 29,6
Réduction du PIB (par rapport à la base 2010)	- 1,0 %	- 0,4 %	—
Effet sur les termes de l'échange ^(*)	+ 2,39 %	0,7 %	—
Pertes de surplus (variation équivalente %)	- 0,49	—	—
Coût interne y compris distorsions fiscales (Mds\$95)	—	- 45,6	—
Gains des termes de l'échange (Mds\$95)	—	8,2	—
Surplus (Mds\$95)	- 49	- 37,4	—

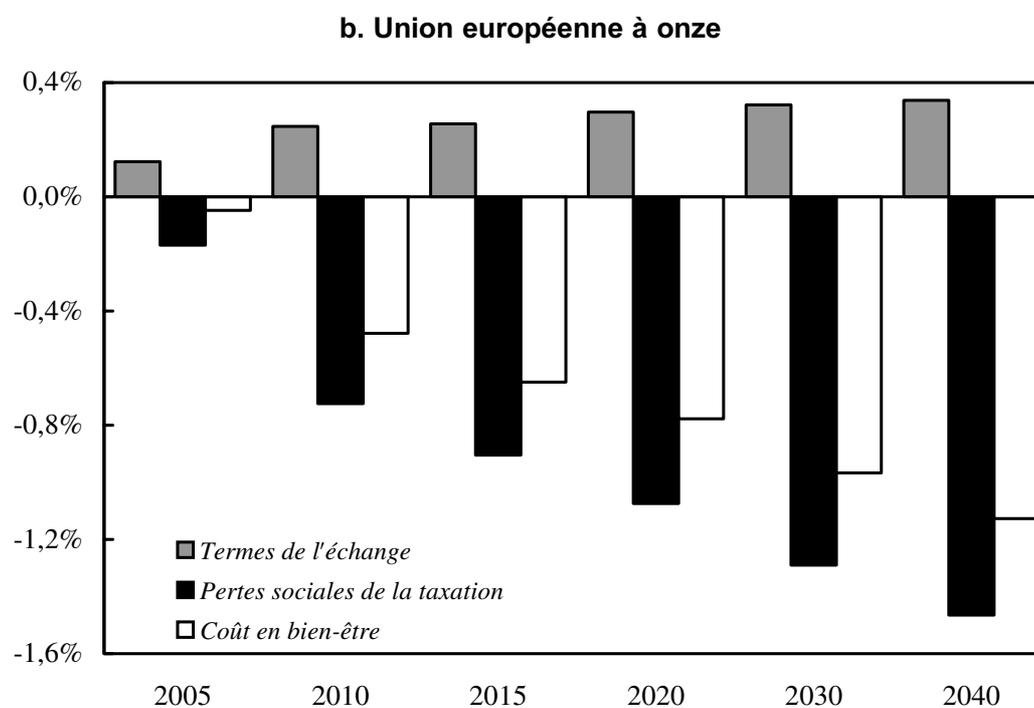
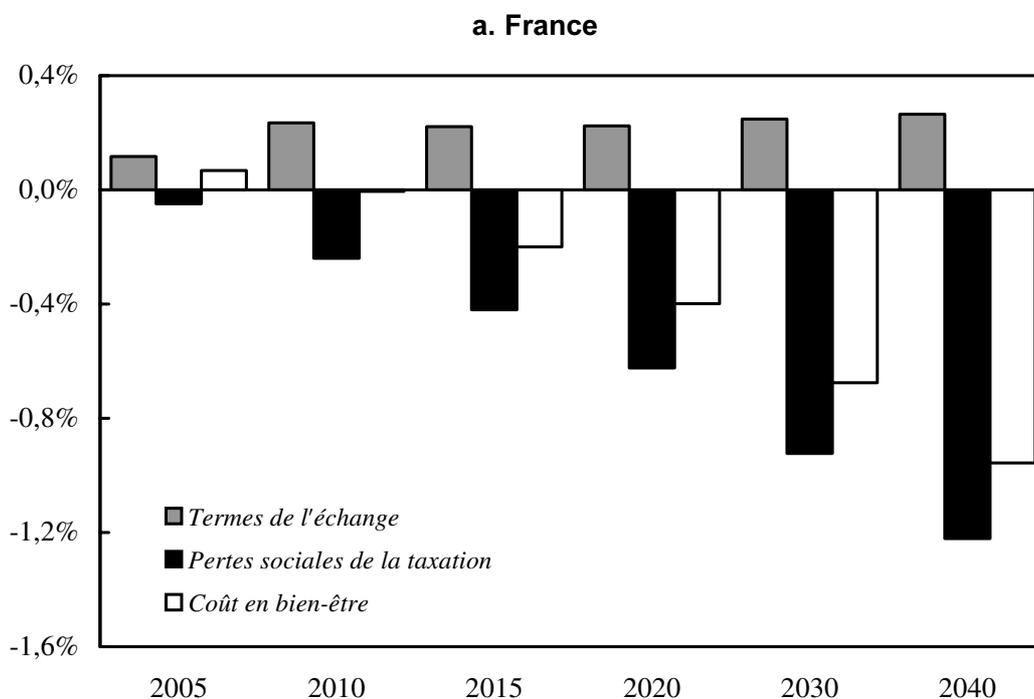
b. France

	EPPA	GEMINI-E3	POLES
Baisse d'émission (MtC)	20,3	19,2	17,0
Baisse d'émission (par rapport à la base 2010)	- 17,5 %	- 15,8 %	- 14,0 %
Taxe sur le carbone (\$95)	136	237	185
Coût direct (Mds\$95)	- 1,23	- 1,9	- 1,35
Réduction du PIB (par rapport à la base 2010)	- 1,1 %	- 0,2 %	—
Effet sur les termes de l'échange ^(*)	+1,1 %	+0,7 %	—
Pertes de surplus (variation équivalente %)	- 0,67	—	—
Coût interne y compris distorsions fiscales (Mds\$95)	—	- 3,3	—
Gains des termes de l'échange (Mds\$95)	—	2,6	—
Surplus (Mds\$95)	- 12	- 0,7	—

Note : (*) Variation du rapport du prix des exportations sur le prix des importations.

Source : D'après les modèles EPPA (Massachusetts Institute of Technology), POLES (Institut économique et politique de l'énergie à Grenoble) et GEMINI-E3 (Commissariat à l'énergie atomique et ministère de l'Équipement).

1. Poids relatifs des composantes de coût de bien-être



Source : Résultats du modèle GEMINI-E3.

1.7. Le poids relatif des différentes composantes, à contrainte croissante

L'étude de ces différentes composantes montre que leur évolution est différente à mesure que l'abattement devient plus contraignant. L'étude réalisée par Bernard et Vielle (2001) avec le modèle GEMINI-E3 permet en particulier d'étudier, à contrainte croissante, d'une part, l'écart entre le niveau de taxes et le coût marginal d'abattement et, d'autre part, l'évolution des gains ou pertes liés aux termes de l'échange.

Les gains ou pertes des termes de l'échange sont relativement importants, notamment dans la phase initiale de réduction des émissions mondiales. En effet ils suivent (en première approximation) une loi d'évolution linéaire par rapport aux prix, et donc proportionnelle au niveau d'abattement (mondial). Le coût interne quant à lui semble suivre une loi de type quadratique. Il en résulte qu'à court terme, le coût importé pèse relativement plus que le coût domestique, et qu'à long terme, le coût domestique devient prépondérant. C'est du moins ce qu'il ressort des simulations de GEMINI-E3 pour la France et l'Europe.

2. Les coûts des accords internationaux sur le climat : l'horizon de Kyoto

2.1. Après La Haye, Bonn et Marrakech : le futur marché des permis d'émissions selon le modèle POLES-ASPEN

L'objet de cette partie est de proposer un chiffrage des développements successifs de la négociation sur le changement climatique au cours de différentes Conférences des parties (COP) depuis le protocole de Kyoto – que nous appellerons « Accord initial » (AI) jusqu'à l'« Accord Bonn-Marrakech » (BM) après le retrait des États-Unis du processus de Kyoto, en passant par le « compromis manqué » (CM) qui aurait pu être atteint à La Haye en 2000. Dans ces trois cas, il est considéré que le marché international de droits d'émissions est compétitif, c'est à dire que l'offre et la demande de permis ne sont pas contraintes.

Il apparaît alors que l'Accord Bonn-Marrakech contient des facteurs majeurs d'incertitude pour l'avenir du marché international des permis puisque dans ce cas, il est possible que l'offre de permis excède structurellement la demande. C'est pourquoi nous analysons dans la dernière partie les difficultés posées par la présence de l'« air chaud » (permis dépassant les émissions actuelles) provenant des économies en transition (CEI et économies d'Europe de l'Est [EEE]) durant la première période d'engagement (2008-2012) et la question du pouvoir de marché potentiel de ces pays ou des modalités d'une gestion négociée de l'air chaud.

Les résultats quantitatifs présentés s'appuient sur l'utilisation du modèle POLES⁽³⁾ et du logiciel ASPEN⁽⁴⁾. Le modèle simule la demande et l'offre d'énergie, de manière récursive en pas annuel, jusqu'en 2030. Il permet la projection des émissions de CO₂ du secteur énergétique ainsi que la construction des courbes de coûts marginaux de réduction de ces émissions dans chacun des 38 pays ou régions. Le logiciel ASPEN utilise alors en entrée les courbes de coûts marginaux produites par le modèle POLES. Il permet de simuler l'offre et la demande de permis en 2010 (choisie comme année représentative de la première période d'engagement) pour toute configuration de marché et, par là, de déterminer le prix d'équilibre de marché (le prix du permis d'émission). L'échange de permis est supposé prendre place sur un marché parfaitement compétitif.

Les hypothèses adoptées pour simuler et évaluer l'*accord initial* sont les suivantes :

- tous les pays de l'Annexe B ayant signé le Protocole de Kyoto sont supposés prendre part à l'échange de permis ;
- un « facteur d'accessibilité » de 10 % est retenu pour les projets du mécanisme de développement propre (MDP) et de plus, une hypothèse de coûts de transactions de 20 % est associée à tous les projets MDP afin de tenir compte des coûts de procédure pour la mise en place de ces projets ;
- enfin le scénario AI ne prend pas en compte les puits de carbone.

Dans ces conditions, le prix international du permis résultant de la confrontation de l'offre et de la demande serait, selon la simulation POLES-ASPEN, de 48 dollars par tonne de carbone (\$/tC)⁽⁵⁾.

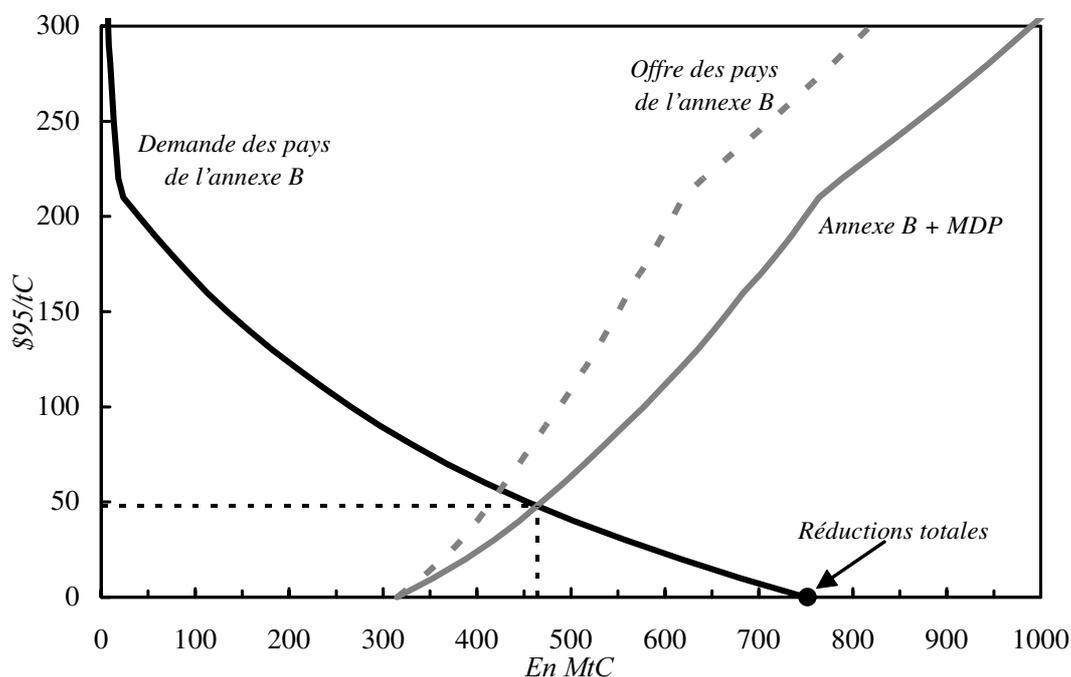
Pour ce niveau de prix, la plupart des pays de l'Annexe B atteindraient leurs objectifs à l'aide de réductions domestiques mais aussi d'importations. Globalement, le recours aux échanges de permis représenterait environ 60 % de la réduction requise. Les régions achetant des permis d'émission seraient les États-Unis, l'Union européenne (UE), la région Canada-Australie-Nouvelle-Zélande (CANZ) et le Japon. Le coût total pour l'Annexe B serait de plus de 28 milliards de dollars. Les régions exportant des permis seraient pour la plus grande part les pays Annexe B de la CEI et des EEE qui disposent d'environ 315 millions de tonnes de carbone (MtC) d'« air chaud », c'est-à-dire de permis à coût nul créés par les réductions d'émission liées à la crise économique de la transition. Dans une moindre mesure, certains pays non-Annexe B seraient également exportateurs, via les projets MDP (qui représentent 52 MtC dans l'ensemble).

(3) POLES est le modèle mondial d'équilibre partiel-énergie développé à l'IEPE et signifie *Prospective Outlook on Long Term Energy Systems*. Dans sa version actuelle, le modèle POLES ne prend en compte que les émissions de CO₂ découlant de la combustion des énergies fossiles.

(4) ASPEN est un logiciel de simulation développé à l'IEPE pour l'analyse des systèmes de permis d'émission négociables.

(5) Les prix et coûts sont dans cette partie exprimés en dollars 1995.

2. Accord initial Kyoto vec échange de permis



Source : POLES-ASPEN.

Les hypothèses adoptées pour quantifier le scénario dit du « compromis manqué » (CM) à La Haye (2000) font référence à des décisions qui auraient pu être prises si la Conférence avait alors débouché sur un accord :

- en plus des hypothèses du scénario AI précédent, la part servant à financer une partie des coûts d'adaptation des pays particulièrement vulnérables est fixée à 2 % des réductions d'émissions certifiées, pour les projets MDP menés dans les pays non-Annexe B autres que pays les moins avancés (PMA).
- les crédits maximum de réductions d'émissions via l'utilisation de puits de carbone sont plafonnés à 3 % des émissions de l'année de référence 1990.

Le prix du permis d'émission décline de 48 \$/tC précédemment à 29 \$/tC dans le scénario « compromis manqué » de La Haye. Ce résultat est expliqué par l'introduction des puits à hauteur de 105 MtC (en excluant les puits des économies en transition), réduisant ainsi les réductions globales effectives d'émissions de 752 à 647 MtC. Les réductions domestiques passent de 288 à 186 MtC, alors que le volume d'échange demeure presque identique, autour de 460 MtC. Néanmoins l'origine des exportations de ces permis diffère de celles du cas AI. Les puits accordés aux pays ayant de l'air chaud augmentent leurs quantités d'émissions attribuées et par conséquent l'écart avec leurs projections d'émissions en 2010 : ces quantités de puits peuvent être échangées tout comme l'air chaud. Les réductions d'émissions provenant de projets MDP diminuent de 52 à 34 MtC car l'introduction de

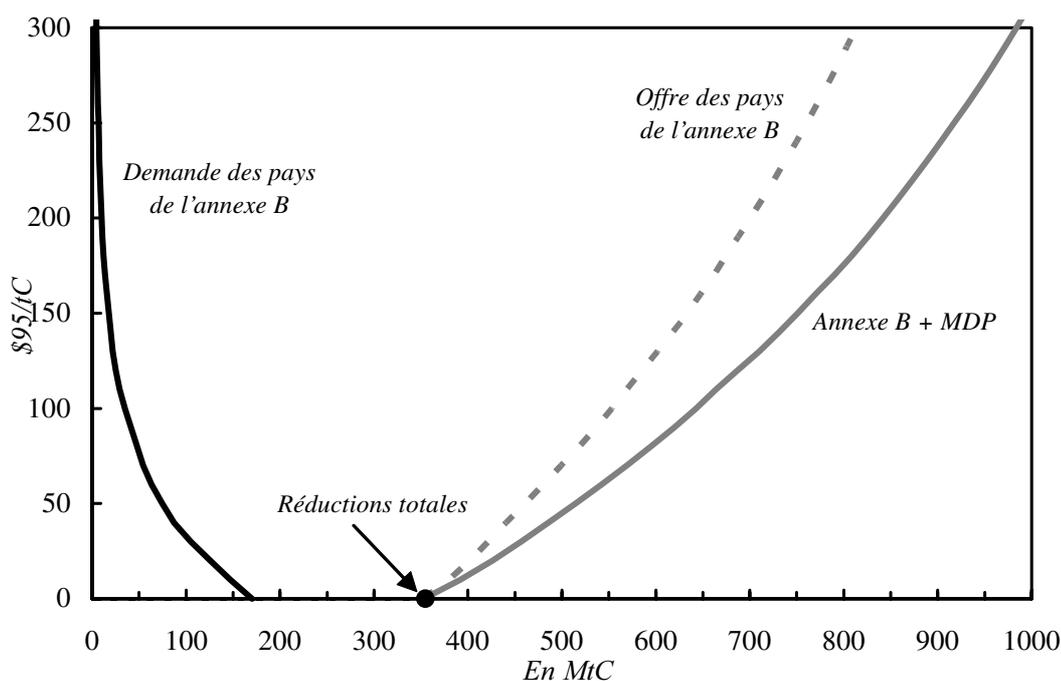
puits à coût nul dans le scénario et le bas prix de marché qui en résulte rendent les projets MDP moins compétitifs.

Les hypothèses régissant le cas Bonn-Marrakech (BM) sont les mêmes que dans le cas CM, après avoir retiré les États-Unis du dispositif et modifié les valeurs attribuées aux puits de carbone. Les puits sont en effet évalués maintenant selon la méthodologie adoptée dans l'Accord Bonn-Marrakech.

La non-participation des États-Unis met les autres pays de l'Annexe B devant une situation singulière puisque l'offre de permis devient, selon les résultats du modèle POLES, plus importante que la demande : en l'absence des États-Unis et en tenant compte des puits de carbone, les réductions requises au sein de l'Annexe B ne s'élèvent plus à 273 MtC mais à 170 MtC ; du côté de l'offre, l'air chaud projeté par le modèle POLES et le surplus créé par l'allocation de puits à l'ex-URSS et aux EEE représentent maintenant 353 MtC.

Théoriquement, l'ensemble de l'Annexe B prenant part au processus pourrait donc globalement atteindre (et faire mieux que) l'objectif sans aucune action spécifique visant à réduire les émissions : les réductions découlant de la récession économique des pays en transition non seulement excèdent en effet la croissance projetée des émissions des autres pays de l'Annexe B pendant la période 1990-2010, mais sont aussi supérieures à la différence entre ces projections et les objectifs des parties. Dans cette situation il n'y aurait nul besoin pour les pays de l'Annexe B de réaliser des projets MDP dans les pays en voie de développement.

3. L'accord Bonn-Marrakech après le retrait des États-Unis, avec échange de permis

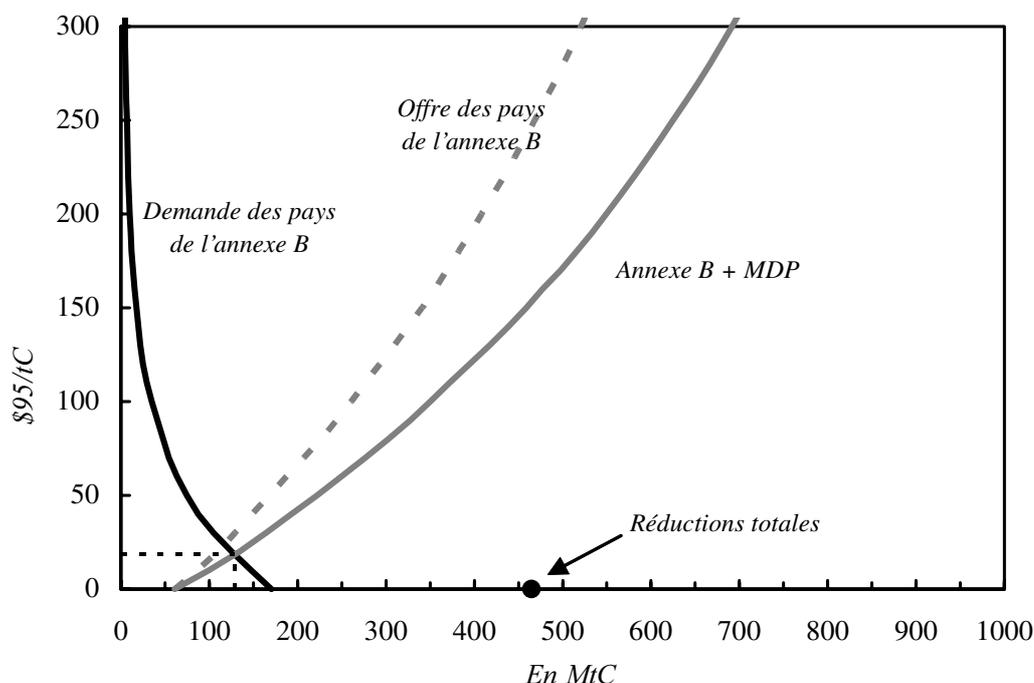


Source : POLES-ASPEN.

Comme le souligne Kopp (2001) : « Le Protocole de Kyoto sans les États-Unis est comme un jeu de chaises musicales avec une chaise en trop – on tourne beaucoup en rond, mais rien ne se passe vraiment ». Cependant, il convient d'explorer l'hypothèse selon laquelle la quantité d'air chaud effectivement échangée serait inférieure à ce qui est disponible. Il semble en effet peu probable que les différentes Parties puissent s'accorder sur un échange gratuit de permis d'émission provenant de l'air chaud des économies en transition. Si tel était le cas, les bénéfices potentiels pour ces dernières régions seraient bien entendu nuls. De plus, certaines Parties potentiellement importatrices (en particulier l'Union européenne) sont désireuses de maintenir une certaine intégrité environnementale au Protocole. Cette intégrité sera d'autant plus significative que l'air chaud n'est mis sur le marché que de manière contrôlée.

Le graphique 4 représente une situation dans laquelle seule une partie de l'air chaud serait mise en vente dans la première période d'engagement. Dans le cas où les économies en transition maximiseraient leurs bénéfices (i.e. ne mettent sur le marché que 7 % de leur air chaud), le prix du permis est de 19 \$/tC. La différence avec les cas précédents (AI et CM) provient évidemment et de la chute de la demande de permis d'émission liée au retrait des États-Unis, et d'une offre qui demeure abondante, malgré l'exercice d'un certain pouvoir de marché de la part des économies en transition.

4. L'accord Bonn-Marrakech avec retrait d'air chaud Émissions mondiales, avec échange de permis : Protocole à 2010



Source : POLES-ASPEN.

2.2. Le problème de la coordination des politiques climatiques en Europe : enseignements du modèle EPPA-EU

Contrairement aux modèles du système énergétique, les modèles d'équilibre général appliqués (MEGA), tels que EPPA-EU⁽⁶⁾, permettent d'estimer le coût en bien-être mesuré en variation équivalente (EV), de l'engagement de Kyoto. Deux composantes essentielles de ce coût peuvent être distinguées, sachant que le modèle EPPA repose sur l'hypothèse de biens domestiques et biens importés imparfaitement substituables (hypothèse « Armington ») : le coût interne, mesuré en perte de PIB, associé aux modifications des prix relatifs au niveau domestique ; les pertes (ou gains) de bien-être liées à une évolution (dé)favorable des termes de l'échange. L'impact sur les prix des énergies est un des facteurs-clés contribuant à modifier favorablement les termes de l'échange des pays soumis à une contrainte sur les émissions. En effet, ces pays sont généralement des importateurs nets d'énergie dont le prix a tendance à baisser, relativement aux biens exportés, sous l'effet d'une contraction de la demande mondiale d'énergie.

Selon le modèle EPPA, le coût en bien-être de la contrainte Kyoto pour les pays de l'Union européenne se situerait dans une fourchette comprise entre 0,6 et 5 %. Les pertes de revenu sont généralement atténuées par un mouvement favorable des termes de l'échange. Ceci n'est toutefois pas vrai pour le Royaume-Uni qui est un exportateur de pétrole et pour le Danemark, pays où l'énergie et les biens intensifs en énergie représentent une part très faible des importations totales du pays comparativement aux autres pays européens.

3. Décomposition des effets économiques de Kyoto sans échanges internationaux de permis

En %

	Bien-être	PNB	Terme de l'échange
Allemagne	- 0,63	- 1,17	1,10
Danemark	- 3,97	- 5,72	- 0,74
Espagne	- 2,83	- 4,76	2,06
Finlande	- 1,90	- 2,73	1,67
France	- 0,67	- 1,11	1,11
Italie	- 1,01	- 1,47	1,54
Pays-Bas	- 4,92	- 7,19	0,55
Royaume-Uni	- 0,96	- 1,14	- 0,77
Suède	- 3,47	- 5,11	1,18
Autres pays européens	- 1,23	- 2,12	1,07
États-Unis	- 0,49	- 1,01	2,39
Japon	- 0,22	- 0,49	2,70

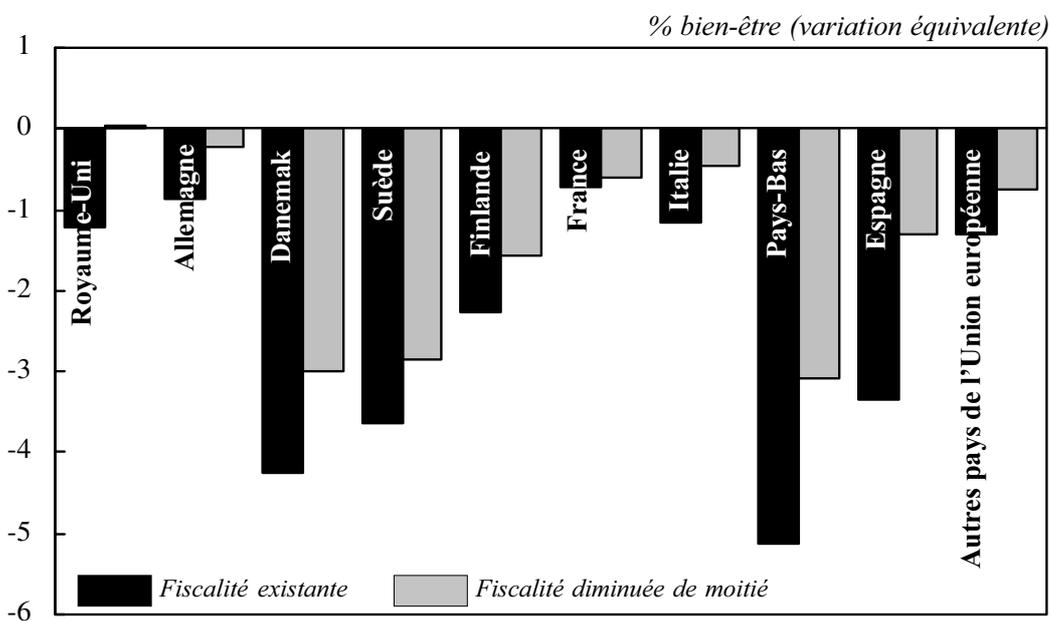
Source : Modèle EPPA.

(6) Le modèle EPPA (*Emissions Prediction and Policy Analysis*) est un MEGA dynamique-récuratif, représentant l'économie mondiale en 12 régions et 10 secteurs économiques, développé par le *MIT Joint Program on the Science Policy of Global Change* pour évaluer les impacts économiques des politiques du changement climatique (Babiker *et al.*, 2000). EPPA-EU est une nouvelle version du modèle intégrant les principaux pays de l'Union européenne et une meilleure représentation du secteur des transports (Viguié *et al.*, 2001).

Il y a généralement une correspondance entre le prix du carbone et le coût total de la contrainte mesurée en perte de bien-être : par exemple, les pays ayant une valeur nationale du carbone modérée subissant une perte limitée de leur revenu et de leur bien-être. Cette correspondance n'est toutefois pas systématique. La France, par exemple, présente une valeur du carbone élevée et un coût social faible comparativement aux autres pays. Ces différences proviennent de différents facteurs tels que l'intensité en carbone du PIB, l'effet des termes de l'échange et la pente de la courbe de coût marginal qui reflète les possibilités de substitutions.

D'autre part, alors que dans l'Union européenne les marchés de l'énergie sont soumis à une fiscalité très forte, il est connu que les taxes existantes tendent à créer un effet d'interaction ayant pour conséquence d'accroître les pertes de surplus associées à toute nouvelle mesure de réduction des émissions de carbone (Bovenberg et Mooij, 1994, Parry, 1995, Bovenberg et Goulder, 1996, Fullerton et Metcalf, 1997 et Bernard et Vielle, 2001). Les modèles MEGA, intégrant la fiscalité pré-existante, sont en mesure de prendre en compte cet effet.

5. Les impacts de taxations existantes sur le coût social de Kyoto



Source : EPPA.

On peut ainsi comparer un scénario où chaque pays européen réaliserait son objectif de réduction par le biais d'une taxation uniforme, sans recours aux permis internationaux, en présence des fiscalités existantes et dans le cas où 50 % des fiscalités seraient supprimées. Comme le montre le

graphique 5, la suppression d'une partie des taxes existantes permettrait de réduire assez nettement l'impact économique de la nouvelle contrainte sur le carbone.

Le coût social de Kyoto pourrait être réduit par la suppression des distorsions liées aux taxations sur l'énergie. Évidemment, cette solution est difficilement envisageable, compte tenu de l'importance des recettes fiscales issues de la fiscalité énergétique. Une solution alternative pourrait consister à tenir compte de ces distorsions dans l'allocation des permis d'émission entre les secteurs. Cela devrait conduire les décideurs à allouer davantage de permis aux secteurs déjà fortement taxés que ce que préconiserait une égalisation des coûts marginaux de réduction par le biais d'une taxe ou d'un système national de permis négociables. Cette solution suppose cependant une bonne connaissance des émissions futures de chaque secteur et de ses possibilités d'abattement car une mauvaise allocation peut rapidement accroître le coût total d'une politique climatique. Une autre solution pourrait également être envisagée : il s'agirait de substituer la taxe sur le carbone à des taxes existantes pesant sur l'énergie de façon à réduire le coût de la politique climatique tout en améliorant l'environnement.

Certains États ayant pris des engagements à Kyoto pourraient être tentés d'adopter des comportements stratégiques visant à protéger la compétitivité internationale de leur industrie, et notamment à limiter l'impact de la contrainte sur le carbone sur les exportations des industries intensives en énergie. Les MEGA, fournissant une représentation complète de l'économie, sont à même de prendre en compte l'ensemble des effets de telles stratégies (Babiker et *al.*, 2001).

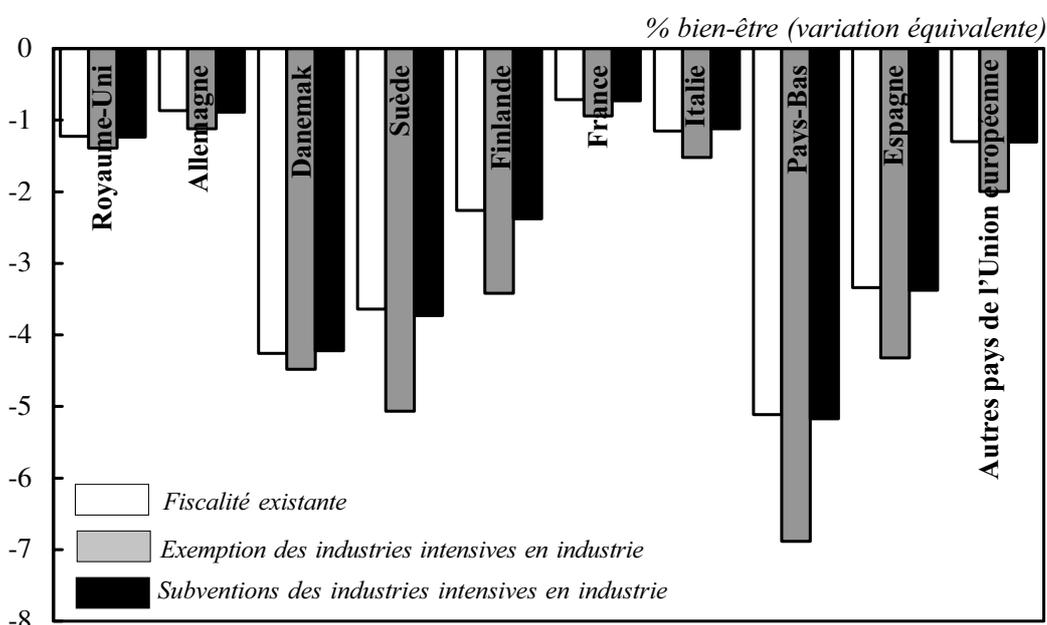
Pour le montrer, on peut étudier deux scénarios. Dans un premier cas, nous supposons que les pays de l'Union européenne décident de concert de réaliser leurs engagements tout en exemptant leurs industries intensives en énergie de toute contrainte sur les émissions de carbone. Dans le second cas, nous supposons que chaque État membre réalise son objectif par le biais d'une taxe uniforme (ou de systèmes nationaux de permis négociables), mais que les industries intensives sont subventionnées à hauteur du montant de la taxe payée.

Comme le montre le graphique 6, l'exemption des industries intensives en énergie a pour effet d'accroître le coût social de la contrainte Kyoto. Bien que bénéfique pour les industries intensives, cette politique tend à déplacer l'effort sur les autres secteurs. De ce fait, les niveaux de production sont sensiblement réduits dans certains secteurs tels que l'agriculture et les autres industries dans la plupart des pays. Le coût additionnel imposé à ces secteurs par la politique d'exemption est supérieur aux gains enregistrés par les industries intensives en énergies.

Les résultats des exercices menés avec le modèle EPPA montrent donc que la politique d'exemption serait une option coûteuse pour favoriser les

secteurs économiques ouverts à la concurrence internationale. L'exemption introduit en effet de nouvelles distorsions au niveau de l'allocation des facteurs de production et de la consommation impliquant des pertes importantes de bien-être. De ce point de vue, l'analyse confirme les enseignements de la littérature économique : la politique de taxation-subvention permet de soutenir les exportations à moindre coût que la politique d'exemption (voir, par exemple, Bhagwati et Ramaswami, 1963, Dixit et Kyle, 1985 ou Krugman, 1996).

6. Les effets sur le bien-être de l'exemption *versus* taxation-subvention



Source : EPPA.

3. Les coûts des accords internationaux sur le climat : l'horizon post-Kyoto et le long-terme

3.1. L'attribution des droits d'émission au plan mondial et à long terme : enseignements de GEMINI-E3

Le caractère de bien public mondial de l'effet de serre justifie, tant pour des raisons d'efficacité économique que d'équité internationale, une coordination des politiques nationales ou régionales. L'efficacité économique nécessite évidemment que les réductions d'émission soient effectuées là où elles sont les moins coûteuses. Un moyen de l'obtenir est de mettre en place les mécanismes dits de flexibilité, et notamment la possibilité de procéder à

des échanges de droits d'émission, en théorie avantageux pour tous les partenaires. Ceci suppose que les droits aient préalablement été établis, sous forme d'engagements par les pays de ramener leurs émissions au-dessous d'un plafond prédéterminé.

Les pays en développement ont été jusqu'ici, pour des raisons d'équité et de responsabilité passée, dispensés de tout engagement. La question d'une éventuelle attribution d'objectifs d'émission pour les périodes d'engagement au-delà de 2012 et pour tous les pays du monde demeure d'une extrême importance pour la poursuite du processus. C'est en effet de la participation des pays hors Annexe B que peuvent être attendus les gains les plus importants de la flexibilité. Une telle participation peut se juger à l'aune de trois critères : l'évolution des émissions, le surcoût pour un même objectif d'abattement au niveau mondial et l'équité.

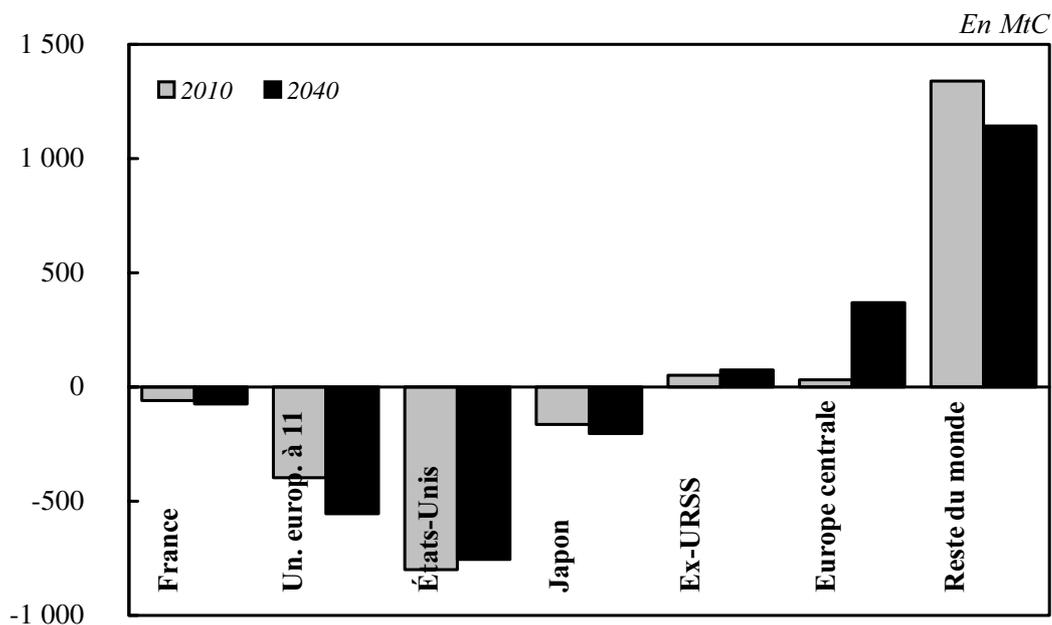
Un accord acceptable pour toutes les parties doit avoir les caractéristiques suivantes :

- le contrôle par les pays de leur politique de changement climatique, incluant la possibilité d'utiliser des permis négociables basés sur une coordination par les quantités et non pas par les prix ;
- une allocation des efforts de chaque pays qui leur apparaisse équitable. Un élément important est que cette coordination doit être mise en place de façon graduelle par le biais notamment de la création de nouvelles institutions. L'apprentissage initial sera en effet prépondérant afin d'éviter, lorsque les politiques seront mises en œuvre à pleine capacité, une déstabilisation de l'économie mondiale.

Les simulations réalisées avec GEMINI-E3 reposent sur les hypothèses suivantes :

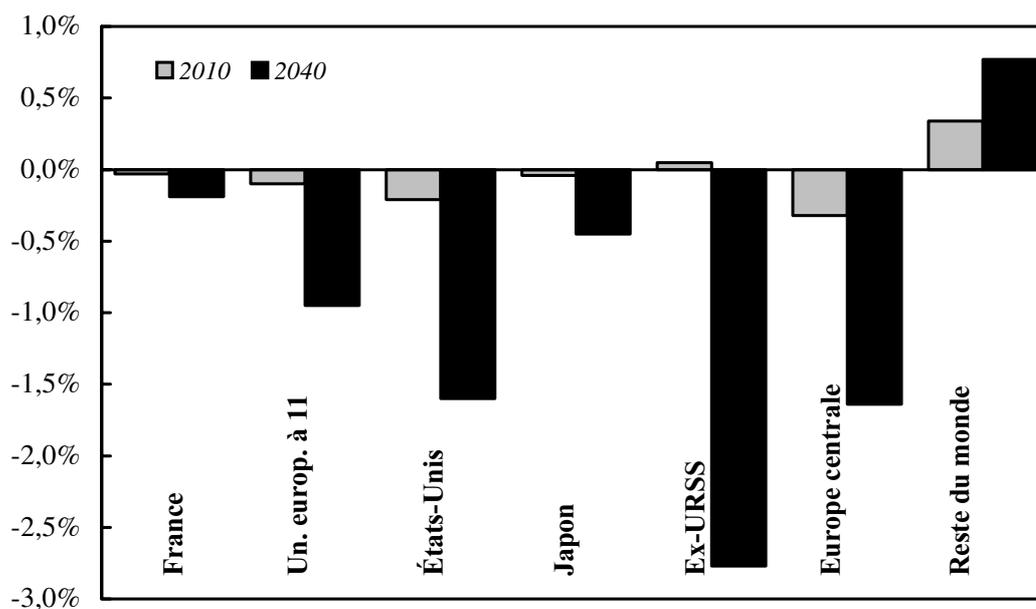
- l'objectif global de réduction des émissions est le même en 2010 que celui défini implicitement à Kyoto (6,3 % par rapport au compte de référence mondial) et il atteint, en 2040, 25 % de réduction par rapport à la référence ;
- la baisse annuelle de l'allocation d'émission définie en pourcentage par rapport aux émissions de référence est limitée à au plus un point (cette contrainte joue uniquement pour l'ex-URSS et les États-Unis) ;
- le quota d'émissions alloué à chaque pays converge à long terme sur une règle définie sur la base d'un montant d'émission par d'habitant égal, cette règle est atteinte en 2030 ou parfois plus tard pour certains pays ; à court terme le quota alloué est supposé égal à 50 % des émissions de référence pour les pays industrialisés et à 100 % pour l'ex-URSS et les pays exportateurs d'énergie ;
- on solde ensuite le reste des émissions sur le reste du monde représentant dans GEMINI-E3 principalement les pays en voie de développement ;
- on instaure un marché de permis négociables au sein de l'ensemble des pays.

7. Ventes nettes de permis



Source : GEMINI-E3.

8. Coût en termes de bien-être en % de la consommation finale des ménages



Source : GEMINI-E3.

4. Allocation des quotas d'émission en pourcentage des émissions du scénario de référence

	<i>En %</i>	
	2010	2040
France	50,0	44,9
Union européenne à 11	50,0	32,8
États-Unis	50,0	35,0
Japon	50,0	34,3
Ex-URSS	100,0	70,0
Europe centrale	100,0	100,0
Reste du monde	125,4	91,3
Monde	97,3	75,0

Source : GEMINI-E3.

L'allocation des quotas d'émission est certainement l'aspect le plus important du scénario. L'objectif est de concilier l'équité en utilisant une règle basée sur une convergence des émissions par tête et un souci de réalisme qui requiert que les allocations de court terme ne soient pas trop éloignées des émissions actuelles.

L'appréciation du scénario doit être réalisée sur le partage des coûts de mise en œuvre des réductions des gaz à effet de serre. Il est ainsi souhaitable que les pays en voie de développement aient un gain net afin de compenser leur vulnérabilité plus grande face aux dommages potentiels du changement climatique sans pour autant que les autres pays subissent une charge trop importante du coût. Bien évidemment les pays producteurs d'énergie fossile (et dans une moindre mesure l'ex-URSS) sont confrontés à un problème spécifique puisqu'une part importante du coût subi résulte d'une détérioration de leurs termes de l'échange.

Dans ce scénario, le prix du carbone s'élève de 13 \$/tC en 2010 à 42, puis 114 et 170 \$/tC, respectivement en 2020, 2030 et 2040. Les résultats du scénario concernant les ventes nettes de permis et le coût en termes de bien-être figurent dans les graphiques 7 et 8.

L'exercice présenté montre qu'il est possible d'atteindre des objectifs ambitieux (- 25 %) avec un coût mondial limité tout en conciliant un objectif d'équité. La règle utilisée pour définir les quotas d'émission est, de plus, incitative pour les pays en voie de développement puisqu'elle leur permet de bénéficier de leur faible taux d'émission par tête. Pour autant certaines zones sont plus pénalisées que d'autres (les États-Unis, l'ex-URSS et les pays exportateurs d'énergie) ce qui montre que la mise en place d'une politique mondiale de réduction des gaz à effet de serre reste sans doute un défi majeur à surmonter au cours des prochaines étapes de la négociation internationale.

3.2. Comparaison de différents scénarios mondiaux d'attribution de droits d'émission pour l'horizon 2030 avec le modèle POLES⁽⁷⁾

Dans la perspective de l'exploration des impacts de différents schémas d'attribution des droits pour l'horizon post-Kyoto, nous proposons ici une comparaison de trois scénarios mondiaux à 2030 :

- « contraction et convergence » (CC) du Global Commons Institute ;
- « compromis global » (GC) de Benito Mueller, Oxford Institute for Energy Studies ;
- « atterrissage en douceur » de l'IEPE-Grenoble.

Ces schémas d'attribution sont appliqués à une « enveloppe globale » qui conduit à une stabilisation des émissions du système énergétique à 10 giga tonnes de carbone (GtC) peu après 2030, soit une réduction de 20 % par rapport à la projection de référence mondiale du modèle POLES. Cette enveloppe globale – si elle est suivie au-delà de 2030 par une réduction des émissions – reste sur le moyen terme compatible avec une trajectoire de stabilisation des concentrations de CO₂ à 550 parties par million en volume (ppmv).

L'analyse des coûts de réduction est menée pays par pays à partir du modèle d'équilibre sectoriel POLES. Elle présente pour principale caractéristique de s'appuyer sur une désagrégation du monde en 38 régions, ce qui permet de faire apparaître l'extrême diversité des situations et des impacts, par exemple, au sein des régions en développement. Il est alors possible de mieux anticiper que dans des approches plus agrégées les obstacles potentiels à l'adoption des règles d'attribution.

Nous présentons tout d'abord l'élaboration d'un premier scénario dit d'« atterrissage en douceur » ou *Soft Landing*, dans le cadre d'une approche pragmatique, tenant compte des contraintes imposées par les dynamiques économiques et énergétiques régionales. La démarche de construction du scénario s'inspire aussi fortement du processus suivi à Kyoto pour tenter de l'adapter à la situation des pays en développement :

- pour les pays de l'Annexe B, le taux de réduction des émissions entre 2010 et 2030 est similaire à celui pour lequel les pays se sont engagés entre 1990 et 2010 dans le Protocole de Kyoto ; par exemple, l'objectif de réduction pour les États-Unis en 2030 est de 7 % par rapport à 2010 et leurs émissions en 2030 ne devront donc pas dépasser $(0,93)^2$ fois leur niveau d'émissions de 1990 ;
- collectivement, les pays non-Annexe B stabilisent leurs émissions globales autour de 2030 ; du fait de cette stabilisation progressive et de la

(7) Extraits du rapport du projet ARES, programme GICC du ministère de l'Environnement.

diminution des émissions de l'Annexe B, les émissions globales se stabilisent et diminuent à plus long terme ;

- pour chaque pays non-Annexe B pris individuellement, la démarche consiste à considérer qu'à partir de 2010 les émissions devront être progressivement stabilisées, mais le délai retenu pour cette stabilisation est d'autant plus long que le pays est initialement pauvre ou faiblement émetteur, en termes d'émission par habitant.

On met ainsi en évidence quatre catégories de pays, parmi lesquelles la première correspond globalement aux pays de l'Annexe B-OCDE et les suivantes distinguent les pays non-Annexe B, selon qu'ils font partie de la catégorie 2 (revenu et émissions élevés), 3 (revenu et émissions intermédiaires) ou 4 (revenu et émissions faibles). Elle permet de justifier la différenciation primaire (pays Annexe B/non-Annexe B) et d'opérer la différenciation secondaire des horizons de stabilisation des émissions des pays non-Annexe B.

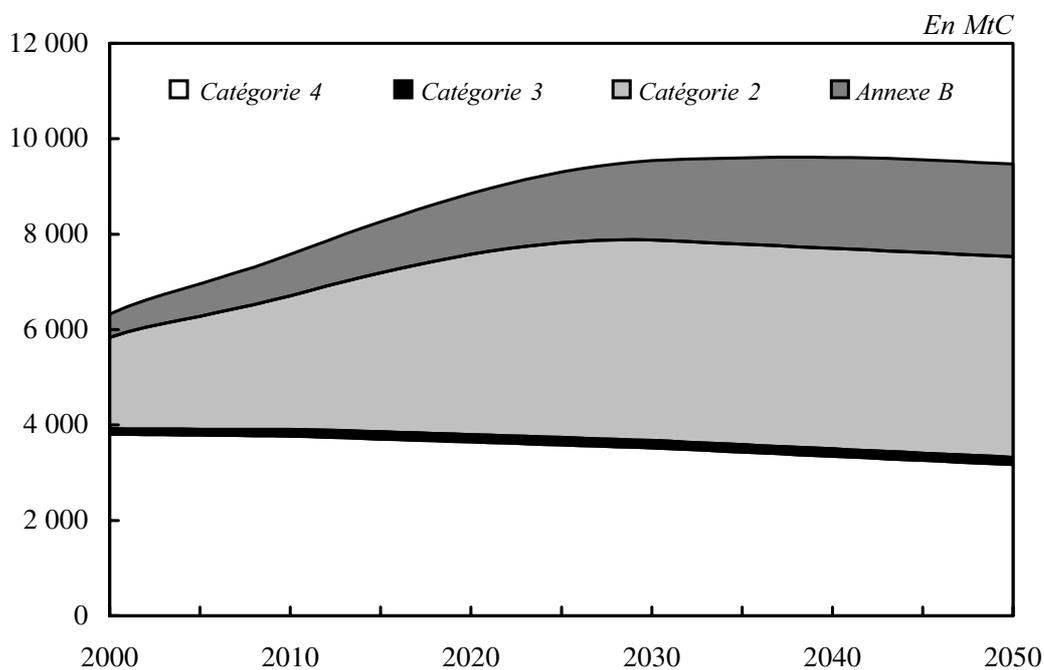
Le principe retenu est que, pour tenir compte à la fois de la capacité des États à payer et de leur responsabilité historique, plus les niveaux de revenu et d'émissions sont élevés et plus l'horizon de stabilisation de leurs émissions doit être rapproché. Inversement, un pays pauvre à faibles émissions par tête ne devra stabiliser ses émissions que dans un futur plus éloigné. Nous prenons ainsi pour hypothèse que les pays de la catégorie 2 devront stabiliser leurs émissions à partir de 2015, ceux de la catégorie 3 à partir de 2030 et ceux de la catégorie 4 à partir de 2045. Les résultats de cette répartition mondiale des droits sont présentés dans le graphique 9.

Le schéma d'attribution dit « contraction et convergence », proposé par le Global Commons Institute au milieu des années quatre-vingt-dix, est régulièrement cité comme un schéma juste et équitable pour les pays en voie de développement, en particulier parce qu'il élimine à terme toute dimension de « *grandfathering* » (allocation en fonction du niveau de pollution passée). Les équations régissant les calculs d'allocation de droits sont décrites par Hohmeyer et Rennings⁽⁸⁾ du ZEW – Center for European Economic Research.

La résorption des inégalités, ou l'instauration de l'équité, entre pays passe par une première étape de « convergence » au cours de laquelle les émissions par habitant des pays tendent vers une valeur commune atteinte à l'année de convergence choisie. Ensuite, au-delà de l'année de convergence, l'ensemble des pays diminuent leurs émissions par habitant de manière identique : c'est la « contraction » des émissions globales.

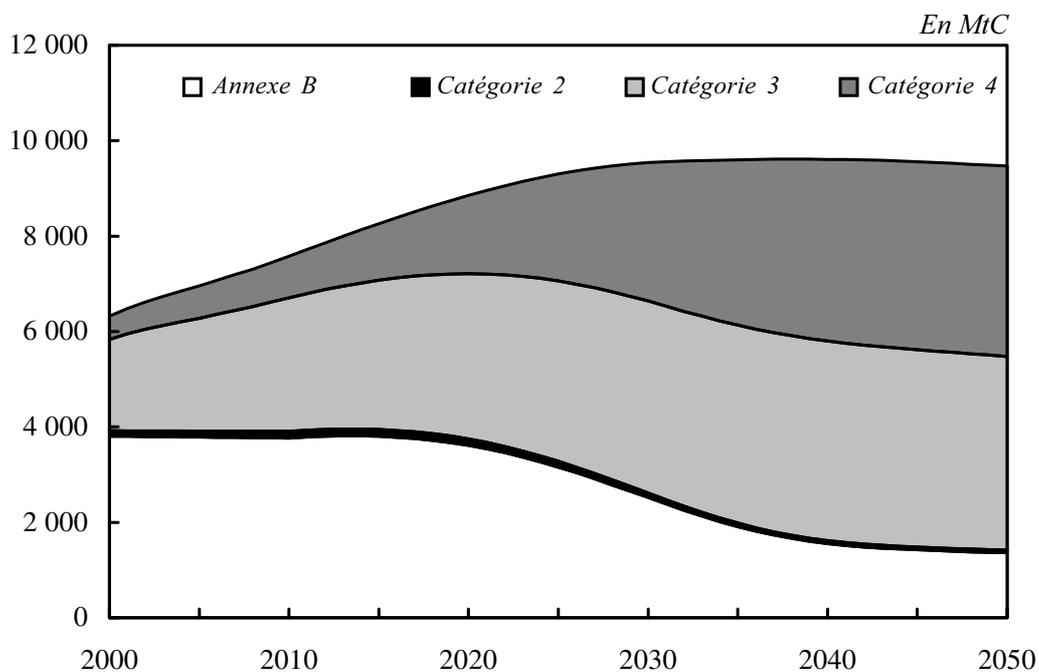
(8) Cf. The Kyoto Protocol and the Emergence of « Contraction and Convergence » as a Framework for an International Political Solution to Greenhouse Gas Emissions Abatement in Man-Made Climate Change. *Economic Aspects and Policy Options*, disponible sur <http://www.gci.org.uk/>

9. Soft Landing : profils d'émission de CO₂



Source : POLES.

10. « Contraction et convergence » : profils d'émission de CO₂



Source : POLES.

L'horizon de convergence est considéré comme prenant place dans le long terme, généralement au-delà de 2050 car la convergence des émissions par habitant vers un niveau commun est *a priori* très contraignante pour les pays développés. L'année de convergence retenue ici est 2050. Tous les pays se voient appliquer la même règle au-delà de 2010. Pour la présentation des résultats dans le graphique 10, nous utilisons cependant les mêmes catégories que celles définies pour le scénario *Soft Landing*.

Les pays de la catégorie 4 auraient dans le cas « contraction et convergence » une part de droits d'émission presque deux fois plus importante en 2030 que dans le cas *Soft Landing* : 31 % des émissions globales (contre 17 %), part qui augmente jusqu'en 2050 (année de convergence). Les pays de l'Annexe B subissent une réduction considérable de leurs droits d'émission entre 2020 et 2040 : alors qu'elle est de 60 % en 2000, elle passerait à 26 % en 2030 (contre 37 % dans le cas SL).

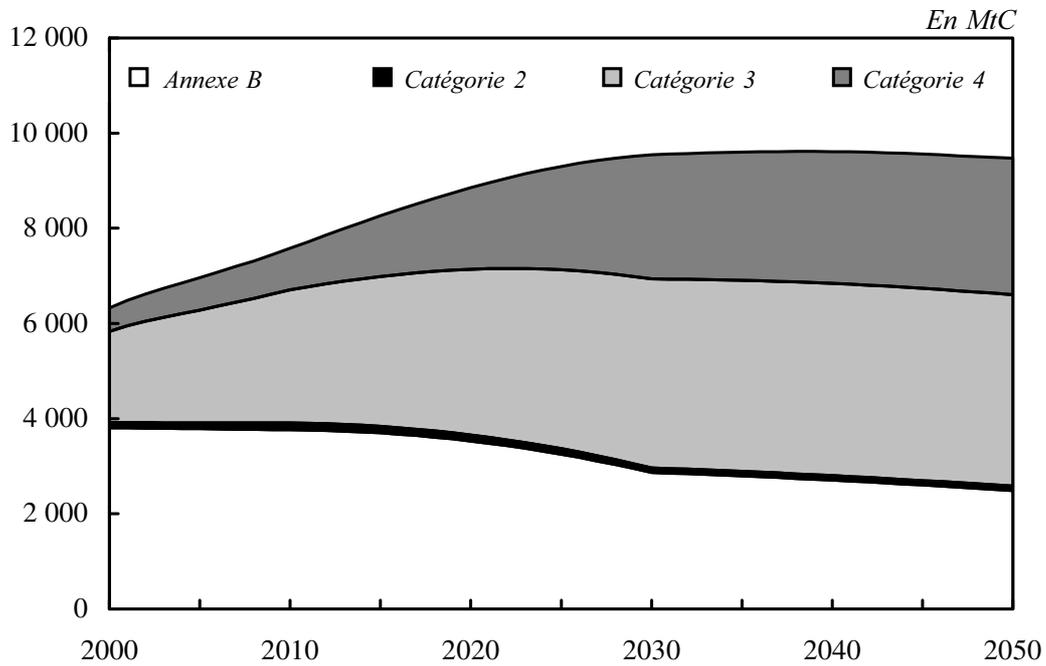
Enfin, le scénario « compromis global » a été proposé par Müller et Bartsch (2000) comme une méthode d'allocation des droits d'émissions mixte, conjuguant un mode d'allocation de type *grandfathering* et un mode d'allocation considérant une égalisation des émissions par habitant des pays.

La part des émissions globales allouée pour chacun des pays à une date donnée (2030 dans l'étude présente) est obtenue en sommant les parts d'émissions calculées pour les deux modes d'allocation pondérées par les coefficients attribués à chacun de ces deux modes, *grandfathering* et allocation égale par tête. Les coefficients de pondération sont la fraction relative de la population mondiale préférant l'un ou l'autre système en 2005, date supposée des négociations portant sur les modes d'attribution de droits post-Kyoto. Les parts d'émission sont, dans le premier système, la part d'émission de CO₂ énergétique de chaque pays en 2000 et dans le deuxième système, la part de la population de chaque pays en 2000. En comparant les pourcentages obtenus on obtient la préférence de la population de chacun des pays (qui est supposée aller au mode de calcul le plus généreux pour le pays).

Le graphique 11 montre que dans le cas « compromis global » ce sont les pays de la catégorie 3 qui ont la part des émissions globales la plus importante en 2030 (41,6 %), alors que l'Annexe B et la catégorie 4 ont sensiblement les mêmes droits d'émission (30,1 et 27,3 % respectivement).

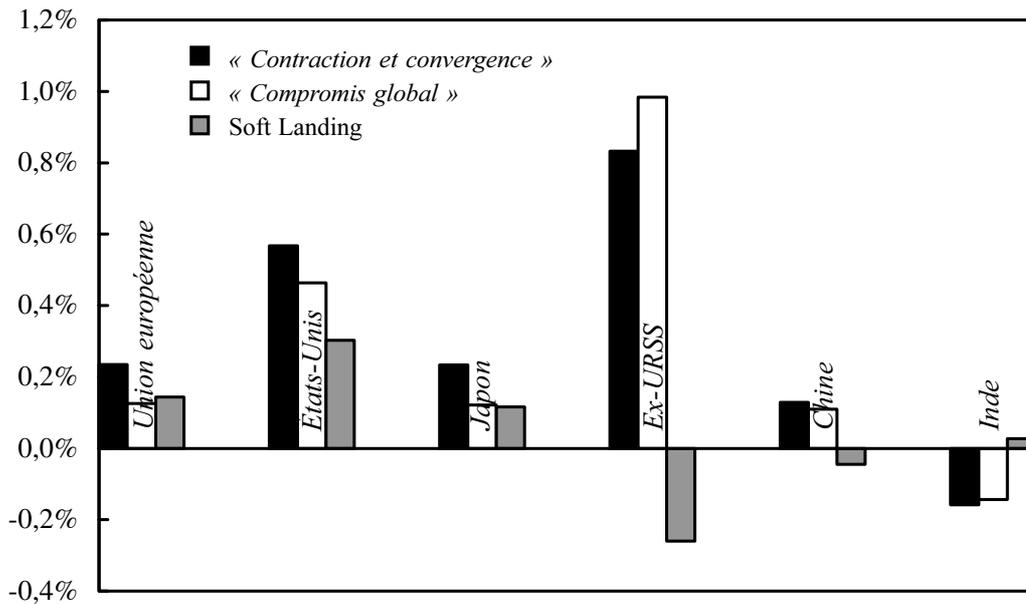
Il est possible de mener une comparaison synthétique de ces trois schémas d'allocation en termes de réductions d'émission, de coûts sectoriels et de taux d'effort (coût sectoriel total/PIB) pour tous les pays ou régions identifiés par le modèle. Fondée sur le modèle POLES, l'analyse ci-dessous se concentre sur les résultats pour six « grands » pays, qui sont des acteurs majeurs dans la négociation internationale : l'Union européenne, les États-Unis, le Japon, l'ex-Union soviétique, la Chine et l'Inde (graphiques 12 et 13).

11. « Compromis global » : profil d'émission de CO₂



Source : POLES.

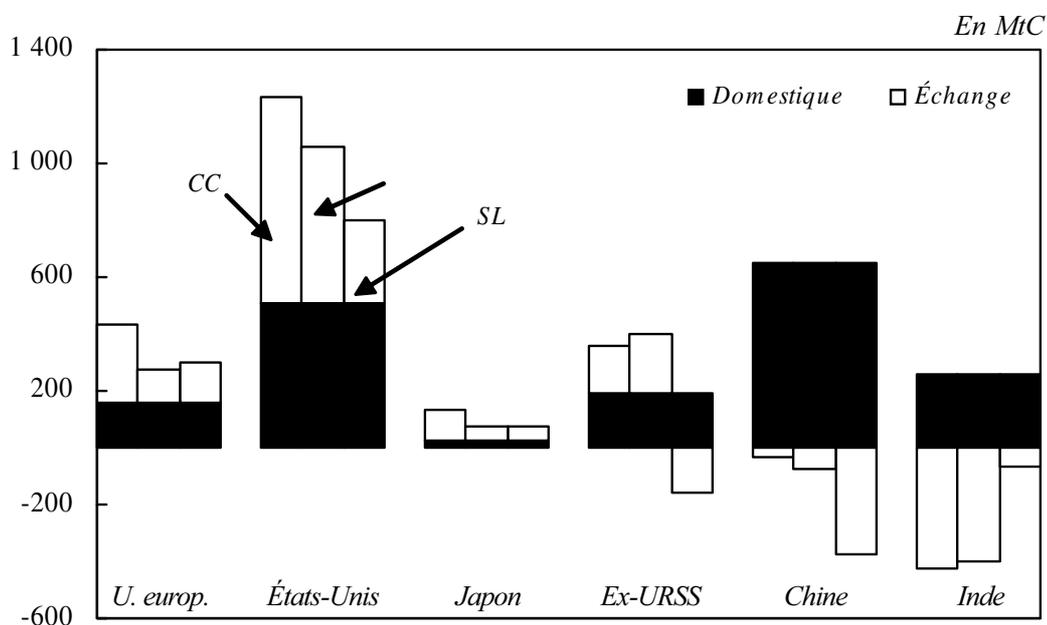
12. Comparaison des taux d'effort (coût total / PIB) en 2030



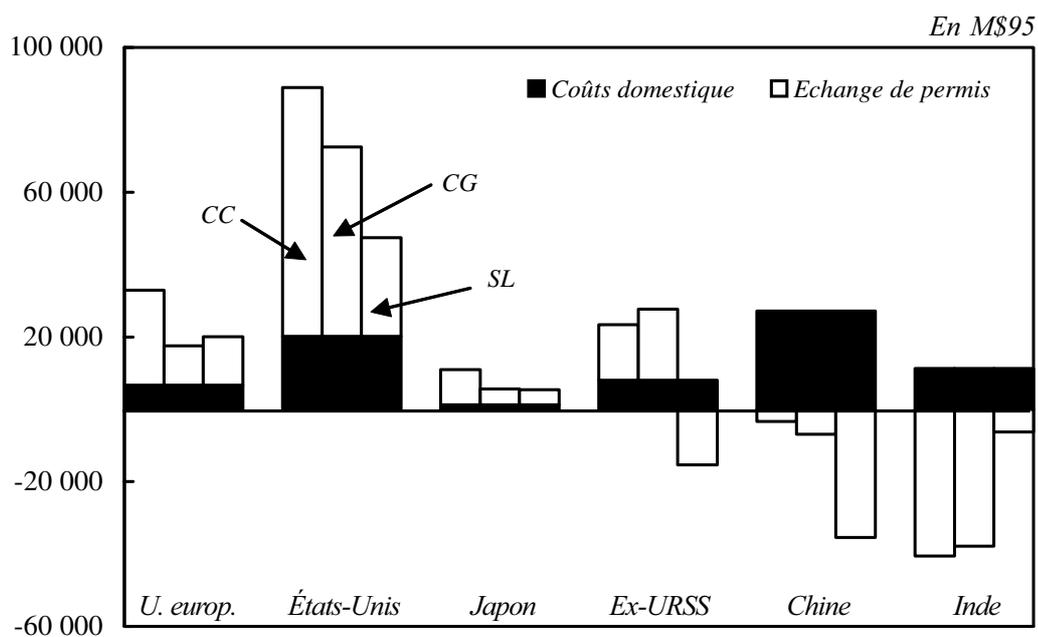
Source : POLES.

13. Comparaison des réductions imposées et des coûts sectoriels en 2030

a. Réduction d'émission



b. Coûts domestiques et échange de permis



Source : POLES.

On note tout d'abord que les différents pays font les mêmes réductions en interne dans les trois règles d'attribution. Ceci s'explique par le fait que les scénarios ont un objectif de réduction globale commun et que dans tous les cas l'échange de permis est pris en compte : quelle que soit la répartition initiale des droits, la courbe de coût marginal agrégée du monde est alors la même et donne le même coût marginal ou prix du permis.

Les pays de l'Annexe B sont dans tous les cas importateurs de permis, à l'exception toutefois de l'ex-URSS dans le scénario *Soft Landing*. En volume total, la demande de permis d'émission et le coût associé sont les plus importants pour les États-Unis, en particulier dans les cas CC et CG. Les coûts de l'Union européenne et du Japon consistent principalement en des achats de permis. Inversement les pays en développement considérés sont dans tous les cas exportateurs. Mais la situation des deux pays d'Asie est loin d'être homogène. En effet, vis-à-vis de l'échange de permis, les situations de la Chine et de l'Inde sont diamétralement opposées. La Chine vend la plus grande part des réductions faites en interne et réalise un profit seulement dans le cas SL, alors que l'Inde gagne dans les cas CG et CC mais a un coût net dans SL car alors les gains dus à l'échange ne compensent pas le coût de réductions domestiques.

En termes de taux d'effort – c'est-à-dire de coût sectoriel total ramené au PIB – et parmi les pays de l'OCDE, ce sont les États-Unis qui auraient le plus d'effort à faire, et ce dans tous les scénarios. On remarque aussi que les taux d'effort de l'Union européenne d'un côté et du Japon de l'autre sont assez proches dans les trois cas, bien que le taux d'effort soit néanmoins plus élevé dans CC. Pour l'ex-Union soviétique dans les cas « contraction et convergence » et « compromis global » le taux d'effort est extrêmement important et ceci s'explique par le niveau initial élevé des émissions par tête. En revanche ce pays devient le principal bénéficiaire du schéma *Soft Landing* en raison du potentiel important de réductions à coût faible qui y sont réalisables. On retrouve bien en termes de taux d'effort les divergences constatées au sein de l'Asie entre la Chine, qui préférerait le mode d'attribution SL, et l'Inde qui bénéficierait de CC ou CG. Néanmoins, on doit constater que le taux d'effort impliqué pour l'Inde par SL n'est pas très élevé, alors qu'il serait significatif pour la Chine dans CC et CG.

Globalement, on constate donc que « contraction et convergence » serait bien le scénario le plus favorable pour les pays en voie de développement alors que *Soft Landing* serait plus avantageux pour les pays de l'Annexe B. On doit cependant souligner les exceptions, touchant des pays importants dans la négociation, notamment les pays de la CEI et la Chine. Les résultats obtenus permettent donc d'anticiper les difficultés qui pourraient surgir dans la mise en œuvre de modes d'attribution de type « contraction et convergence » au niveau international : alors que ces modes d'allocation présentent des caractéristiques apparemment intéressantes en termes d'équité internationale, les coûts qu'ils imposeraient à certains des acteurs-clé des négociations à venir – États-Unis, Russie, Chine – apparaissent très élevés et l'on peut douter alors que ce type de solution leur paraisse acceptable.

L'une des principales conclusions est que les schémas d'attribution de droit de type égalitaire conduisent à des coûts très importants pour certaines catégories de pays, en particulier ceux de l'Annexe B, mais aussi certaines économies en développement ou en transition. D'autres schémas, fondés plutôt sur une réduction progressive des émissions dans l'Annexe B et sur un freinage progressif de leur croissance dans les pays non-Annexe B permettraient de diminuer les écarts de coûts entre régions ainsi que les chocs imposés aux économies, mais n'assureraient pas une convergence aussi poussée que les schémas égalitaires.

Le processus de définition des schémas possibles d'attribution de droits d'émission pour l'ensemble des régions du monde devra donc se poursuivre et affronter cette question de l'arbitrage entre une approche par l'égalité des droits, dont les coûts pourraient s'avérer inacceptables pour certaines Parties, et des approches plus progressives, visant à répartir les coûts de manière plus équilibrée, mais n'assurant pas la stricte égalité des droits.

Références bibliographiques

- Agarwal A. (1998) : « Attribution des quotas : équité ou loi du plus fort ? », *Courrier de la Planète / Global Chance*, mars-avril, pp. 31-32.
- Agarwal A. et S. Narain (1991) : *Global Warming in an Unequal World*, Centre for Science and Environment, New Delhi.
- Agarwal A. et S. Narain (1998) : *The Atmospheric Rights of all People on Earth*, Centre for Science and Environment, New Delhi.
- Babiker M., L. Viguier, J. Reilly, A.D. Ellerman et P. Criqui (2001) : « The Welfare Costs of Hybrid Carbon Policies in the European Union », *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, Rapport n° 74, Cambridge, MA.
- Babiker M.H., J.M Reilly, M. Mayer, R.S. Eckaus, I. Sue Wing et R.C. Hyman (2000) : « The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results », *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, Rapport n° 71, Cambridge, MA.
- Berger C., R. Dubois, A. Haurie, E. Lessard, R. Loulou et J-P. Waub (1992) : « Canadian MARKAL: An Advanced Linear Programming System for Energy and Environmental Modelling », *INFOR*, 30(3), pp. 222-239.
- Bernard A. et M. Vielle (1998) : « La structure du modèle GEMINI-E3 », *Économie et Prévision*, n° 136, octobre-décembre.

- Bernard A. et M. Vielle (2000) : « Comment allouer un coût global d'environnement entre pays : permis négociables vs taxes ou permis négociables et taxes ? », *Économie Internationale*, n° 182, 2^e trimestre.
- Bernard A. et M. Vielle (2001) : *Toward a Future for the Kyoto Protocol: Some Simulations with GEMINI-E3*, Miméo.
- Bernstein P.M., W.D. Montgomery et T.F. Rutherford (1998) : « Trade Impacts of Climate Policy: The MS-MRT Model », *Energy and Resource Economics*, 21, pp. 375-413.
- Blanchard O. et P. Criqui (2000) : « La valeur du carbone : un concept générique pour les politiques internationales et nationales de réduction des émissions », *Énergie Internationale*, Institut Économique et Politique de l'Énergie, Grenoble.
- Blanchard O., P. Criqui, M. Trommetter et L. Viguiier (1998) : *Différenciation, équité internationale et efficacité dans la lutte contre le changement climatique global*, Communication aux Journées AFSE 1998 sur l'Economie de l'environnement et des ressources naturelles, Toulouse, 11-12 mai, 33 p. et *Cahier de Recherche de l'IEPE*, Grenoble, n° 14.
- Böhringer C. et A. Löschel (2001) : « Market Power in International Emissions Trading: The Impact of the US Withdrawal from the Kyoto Protocol », *ZEW Discussion Paper*, n° 01-58.
- Bollen J., A. Gielen et H. Timmer (1999) : « Clubs, Ceilings and CDM: Macroeconomics of Compliance with the Kyoto Protocol », *The Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp. 177-206.
- Burniaux J.M., J.P. Martin, G. Nicoletti et J.O. Martins (1992) : « GREEN. A Multi-Sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO₂ Emissions: A Technical Manual », *Department of Economics and Statistics OECD Working Papers*, n° 116, OCDE, Paris.
- Cooper A., S. Livermore, V. Rossi, A. Wilson et J. Walker (1999) : « The Economic Implications of Reducing Carbon Emissions: A Cross-Country Quantitative Investigation Using the Oxford Global Macroeconomic and Energy Model », *The Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp. 335-366.
- Criqui P. et alii (1996) : *POLES 2.2.*, JOULE II Programme, European Commission DG XVII – Science Research Development, Bruxelles, décembre, 99 p.
- Criqui P. et N. Kouvaritakis (1997) : « Les coûts pour le secteur énergétique de la réduction des émissions de CO₂ : une évaluation internationale avec le modèle POLES », *Cahier de Recherche IEPE*, Grenoble, n° 13, 20 p.

- Criqui P., S. Mima et L. Viguiier (1999) : « Marginal Abatement Costs of CO₂ Emission Reductions, Geographical Flexibility and Concrete Ceilings: An Assessment Using the POLES Model », *Energy Policy*, 27 (10), pp. 585-601.
- Criqui P. et L. Viguiier (2002) : « Régulation des marchés de droits d'émission négociables pour le CO₂ : une proposition de plafonds pour les quantités et pour les prix », *Institut Économique et Politique de l'Énergie*, Grenoble.
- Den Elzen M.G.J. et A.P.G. De Moor (2001) : « The Bonn Agreement and Marrakech Accords: An Updated Analysis », *RIVM Report*, 728001017/2001.
- FCCC (Framework Convention on Climate Change) Ad Hoc Group on the Berlin Mandate (1996) : *Strengthening the Commitments in Article 4.2 (A) and (B). Quantified Emissions Limitation and Reduction Objectives within Specified Time-Frames: Review of Possible Indicators to Define Criteria for Differentiation Among Annex I Parties*, Note by the Secretariat, FCCC/AGBM/1996/7, 21 juin.
- Fishbone L.G. et H. Abilock (1981) : « MARKAL, A Linear Programming Model for Energy Systems Analysis: Technical Description of the BNL Version », *International Journal of Energy Research*, 5, pp. 353-375.
- GCI (Global Commons Institute) (1996) : *Draft Proposals for a Climate Change Protocol Based on Contraction and Convergence. A Contribution to Framework Convention on Climate Change*, Ad Hoc Group on the Berlin Mandate, AGBM/1.9.96/14, 6 septembre.
- Giraud P-N., N. Jestin-Fleury, A. Ayong Le Kama et C. Vilmart (2002) : *Effet de serre : modélisation économique et décision publique*, Commissariat général du plan, La Documentation française, Paris.
- Godard O. (1997) : « De Rio à Kyoto : pourquoi la convention sur le climat devrait intéresser ceux qui ne s'intéressent pas au climat », *Futuribles*, n° 224, pp. 31-68.
- Grubb M., J. Edmonds, P. ten Brink et M. Morrison (1993) : « The Costs of Limiting Fossil-Fuel CO₂ Emissions, a Survey and Analysis », *Annual Review of Energy and Environment*, vol. 18, pp. 397-478.
- Gupta S. et P.M. Bhandari (1999) : « An Effective Allocation Criterion for CO₂ Emissions », *Energy Policy*, n° 27, pp. 727-736.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996) : *Climate Change 1995-Economic and social dimensions of climate change*, Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kopp R. (2001) : « A Climate Accord Without the US », *Weathervane*, 14. Disponible sur <http://www.weathervane.rff.org/features/feature135.htm>

- Kurosawa A., H. Yagita, W. Zhou, K. Tokimatsu et Y. Yanagisawa (1999) : « Analysis of Carbon Emission Stabilization Targets and Adaptation by Integrated Assessment Model », *The Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp. 157-175.
- Loulou R. et A. Kanudia (2002) : « Using Advanced Technology-Rich Models for Regional and Global Economic Analysis of GHG Mitigation » in *Decision and Control in Management Science : Essays in Honor of Alain Haurie*, Zaccour (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, pp. 153-175.
- Loulou R. et D. Lavigne (1996) : « MARKAL Model With Elastic Demands: Application to GHG Emission Control » in *Operations Research and Environmental Engineering*, Carraro et Haurie (eds), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston et Londres, pp. 201-220.
- MacCracken C.N., J.A. Edmonds, S.H. Kim et R.D. Sands (1999) : « Economics of the Kyoto Protocol », *The Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp. 25-71.
- Manne A.S., R. Mendelson et R. Richels (1995) : « MERGE. A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies », *Energy Policy*, 23(1), pp. 17-34.
- Manne A.S et G.R. Richels (2001) : *US Rejection of the Kyoto Protocol: The Impact on Compliance Costs and CO₂ Emissions*, Communication au Forum EMF du 6 août.
- Manne A.S. et C.O. Wene (1992) : « MARKAL-MACRO: A Linked Model for Energy-Economy Analysis », *Brookhaven National Laboratory*, Report BNL-47161, Upton, New York.
- Matuoka Y., M. Kainuma et T. Morita (1995) : « Scenario Analysis of Global Warming Using the Asian Pacific Integrated Model (AIM) », *Energy Policy*, 23 (4/5), pp. 357-371.
- McKibbin W.J., M.T. Ross, R. Shackleton et P.J. Wilcoxon (1999) : « Emissions Trading, Capital Flows and the Kyoto Protocol », *The Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp. 287-333.
- Müller B. (1998) : « Justice in Global Warming Negotiations: How to Obtain a Procedurally Fair Compromise », *Oxford Institute for Energy Studies*, (EV26), décembre, 83 p.
- Müller B. et U. Bartsch (2000) : *Fossil Fuels in a Changing Climate*, Oxford Institute for Energy Studies, Oxford University Press.
- Nordhaus W.D. et J. Boyer (2000) : *Warming the World : Economic Models of Global Warming*, The MIT Press, Cambridge.
- Peck S.C. et T.J. Teisberg (1992) : « CETA: A Model for Carbon Emissions Trajectory Assessment », *The Energy Journal*, 13(1), pp. 55-77.

- Reiner D.M. et H.D. Jacoby (1997) : « Annex I Differentiation Proposals: Implications for Welfare, Equity and Policy », *MIT Joint Programme on the Science and Policy of Global Change*, Rapport 27, Cambridge.
- Tol R. (1999) : « Kyoto, Efficiency, and Cost-Effectiveness: Application of FUND », *The Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp. 131-156.
- Tulpulé V., S. Brown, J. Lim, C. Polidano, H. Pant et B.S. Fisher. (1999) : « The Kyoto Protocol: An Economic Analysis Using GTEM », *The Energy Journal*, Kyoto Special Issue, pp. 257-285.
- United Nations (Department of Economic and Social Affairs) (2000) : Population Division », *World Population Prospects, the 1998 Revision, Volume III: Analytical Report*, United Nations, New York.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (1992) : Texte de l'Accord, New York, 9 mai.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (1997) : *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
Disponible sur <http://unfccc.org/resource/docs/cop3/07a01.pdf>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (1998) : *Report of the Conference of the Parties on its Fourth Session Held at Buenos Aires from 2 to 14 November 1998*, Decision 1/CP.4, FCCC/CP/1998/ 16/Add.1.
Disponible sur <http://unfccc.org/resource/docs/cop4/16a01.pdf>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2001) : *Review of the Implementation of Commitments and of Other Provisions of the Convention; Preparation for the First Session of the Conference of the Parties Serving as the Meeting of the Parties to the Kyoto Protocol*, Decision 5/CP.6, FCCC/CP/2001/L.7, 24 juillet 24. Disponible sur <http://www.unfccc.int/resource/docs/cop6secpart/l07.pdf>
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) (2001) : *The Marrakech Accords and the Marrakech Declaration*. Disponible sur http://www.unfccc.int/cop7/documents/accords_draft.pdf
- Viguié L. (1999) : *L'environnement en économie communiste et post-communiste : de la crise systémique à l'agenda global*, thèse de Doctorat, Université Pierre Mendès-France, Grenoble.
- Viguié L., M. Babiker et J. Reilly (2001) : « Carbon Emissions and The Kyoto Commitment in the European Union », *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, Rapport n° 70, Cambridge, MA.

Vrolijk C., (2001) : *The Bonn Agreement. The World Agrees to Leave the US on the Sideline*, Meeting Report, Discussion Meeting, 8 août, Chatham House, Londres.

Zagamé P., G. d'Alcantara et A. Italianer (1993) : « The HERMES Model for the Member States of the European Community » in *HERMES: Harmonized Econometric Research for Modelling Economic Systems*, Donni, Valette et Zagamé (eds), North Holland.

Complément D

Incertitude, irréversibilités et actualisation dans les calculs économiques sur l'effet de serre

Franck Lecocq

Banque mondiale, Groupe de recherche en économie du développement

Jean-Charles Hourcade

*Centre international de recherche sur l'environnement
et le développement (CIRED), Unité mixte de recherche CNRS-EHESS 8568*

Introduction

Le problème l'effet de serre pose un défi singulier au calcul économique. Caractérisé par de très fortes incertitudes à la fois sur l'ampleur des dommages et sur les coûts des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre, il porte sur un horizon temporel qui englobe plusieurs générations. Or, du fait de la double inertie des systèmes économiques et de l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, attendre que la recherche scientifique réduise les incertitudes, c'est prendre le risque de décisions trop tardives et il faut bien se résigner à décider « en méconnaissance de cause ». Voilà l'économiste requis d'informer la décision publique ; mais, ce faisant, il prend le risque d'être accusé d'extrapoler sur le long terme, en s'abritant sur une technicité illusoire, les schémas du financier et de l'ingénieur optimisant un portefeuille ou une séquence d'investissements, et d'ignorer des principes éthiques comme la solidarité intergénérationnelle ou le « principe de précaution ».

L'objet de ce complément est d'examiner sous quelles conditions le calcul économique peut, malgré des difficultés évidentes, éclairer le débat public face à un défi si inédit. Disons très vite, pour éviter tout malentendu, qu'il ne peut prétendre dicter « la bonne solution » mais que, parce qu'il faut coordonner les anticipations sur les différents futurs possibles en présence de fortes controverses scientifiques, éthiques, politiques, il peut constituer un « langage de négociation » (Henry, 1984) empêchant que ne l'empor-

tent, sans plus ample examen et aux dépens de l'intérêt collectif, les acteurs disposant de la rhétorique la plus séduisante.

Nous reviendrons tout d'abord sur les fondements de l'actualisation, ce qui nous permettra d'expliquer, dans une deuxième partie, pourquoi il ne faut pas trop rapidement disqualifier les outils du calcul économique, même quand il s'agit de très long terme. Puis, dans une troisième partie, nous aborderons les problèmes spécifiques liés à l'incertitude et montrerons que l'essentiel se joue sur l'adoption d'une problématique de décision séquentielle et sur la façon d'utiliser dans ce cadre les outils de l'analyse économique, ce que nous illustrerons à partir d'enseignements pour l'action à court terme tirés de trois exercices autour du couple incertitude-inertie.

1. Le taux d'actualisation, une traduction de « visions du long terme »

La pratique standard du calcul économique consiste à établir la chronique, par rapport à un scénario de référence donné, des coûts et des bénéfices des différentes options politiques puis à ne retenir que les options dont la valeur nette actualisée à l'horizon t est positive :

$$(1) \quad \sum_t \frac{\text{Bénéfices}_t - \text{Coûts}_t}{(1 + \rho)^t} > 0$$

Ceci confère un caractère central à la valeur du taux d'actualisation ρ . Vu le décalage temporel entre les coûts des politiques de réduction des émissions et leurs bénéfices (les dommages évités), on conçoit qu'émerge l'idée d'une contradiction fondamentale entre calcul économique et protection du climat : si ρ égale 8 %, chaque euro non affecté à la protection du climat nous permettra de léguer 10 euros à nos enfants dans trente ans et 47 euros à nos petits enfants dans cinquante ans. À ce compte là, il faudrait des dommages climatiques énormes pour justifier l'action ; nos descendants seront en effet assez riches pour « se payer » les compensations nécessaires (déménager dans des zones moins touchées, construire des digues, etc.).

Mais ceci revient à oublier que le taux d'actualisation reflète la tension entre la quantité d'épargne disponible pour financer l'investissement et la productivité présente et future de l'économie (Boiteux, 1969). Il ne prend donc sens qu'au sein d'une prospective où on s'assure de la cohérence entre la propension à épargner des agents, l'état présent et futur des techniques de production et le rythme de croissance qui en résulte. En fait la formule simple dont nous sommes partis repose sur deux piliers qu'il faut bien garder à l'esprit.

Le premier est une métaphore, utile, mais qui n'est qu'une métaphore : celle du planificateur bienveillant auquel la société délègue la sélection du plan de consommation qui maximise le bien-être collectif. Ainsi mandaté,

ce planificateur doit sommer à la fois les utilités individuelles des citoyens d'une même génération et celles des générations situées à des périodes différentes. Cela peut choquer le non-économiste, mais il faut se résigner au fait que toute décision revient bien à répartir des gains et des pertes entre individus différents dans le temps et l'espace et que le choix n'est pas entre calculer ou pas, mais entre rendre ou non explicites, donc discutables, les bases du choix effectué. La fonction objectif du planificateur peut donc s'écrire comme suit, avec $c_{t,i}$ le niveau de consommation de l'individu i de la génération t , et $U_{t,i}$ la fonction d'utilité de cet individu particulier.

$$(2) \quad \text{Max} \sum_t q_t \sum_i \alpha_i U_{t,i}(c_{t,i}) \quad \text{avec} \quad q_t = \frac{1}{(1+\delta)^t} \quad \text{et} \quad \delta > 0$$

Dans cette équation, les poids α_i pondèrent les utilités des individus à l'intérieur d'une même génération, et les facteurs d'actualisation q_t les utilités de générations différentes. Le choix des α_i est de nature politique puisqu'il traduit un jugement sur l'équité de la distribution actuelle des revenus ; avec des poids égaux à un, le planificateur maximisera le bien-être global en redistribuant massivement les revenus jusqu'à obtenir (avec des individus ayant des préférences identiques pour la consommation) égalité des revenus par tête. De même qu'une éthique égalitariste milite pour des α_i unitaires, il est alors tentant de conclure qu'un environnementaliste devrait militer pour des facteurs d'actualisation égaux à 1, donc à un taux d'escompte social δ nul pour justifier l'action immédiate.

Mais une telle « liberté » est limitée par le deuxième pilier logique qui sous-tend l'équation (1), à savoir un modèle de croissance qui traduit les contraintes technico-économiques dans lesquelles le planificateur doit travailler. Ces contraintes peuvent être résumées dans le modèle suivant où, à chaque période de temps la combinaison des facteurs travail L et capital K permet la production d'un bien composite Y , décrite par l'équation (3). La production du bien composite est répartie entre consommation C et investissement I (4), et l'investissement permet d'accroître le stock de capital à la période suivante selon la dynamique d'accumulation décrite par l'équation (5), dans laquelle η représente le taux de dépréciation annuel du capital.

$$(3) \quad Y_t = K_t^\alpha L_t^{1-\alpha} \quad \text{Fonction de production}$$

$$(4) \quad Y_t = C_t + I_t \quad \text{Répartition de la production entre } C \text{ et } I$$

$$(5) \quad K_{t+1} = (1 - \eta) K_t + I_t \quad \text{Accumulation du capital}$$

Ce modèle est du type de ceux développés depuis Ramsey (1928) et Solow (1956) qui visent à identifier les trajectoires de croissance optimales résultant de la conjugaison des préférences des agents, des possibilités techniques et de la dotation initiale en facteurs de production. Ils donnent un

rôle important à la consommation comme objectif ultime de l'activité, mais le « moteur » de la croissance économique est l'accumulation du capital, celle-ci permettant, selon des modalités plus ou moins sophistiquées suivant les modèles, d'entraîner le changement technique et l'évolution des productivités.

Le taux d'actualisation optimal ρ (c'est-à-dire le coût d'opportunité du capital, ce qu'on perd en l'affectant à un usage donné) n'est autre que la productivité marginale du capital. On montre alors (Arrow, Cline et *al.*, 1996) qu'il respecte la relation suivante (6), où δ est le taux d'escompte social correspondant à la fonction de préférence (1), g est le taux de croissance optimal de l'économie, et où ν reflète la vitesse à laquelle l'utilité marginale de la consommation décroît lorsque le niveau de consommation augmente (un euro rapporte une utilité moindre au riche qu'au pauvre).

$$(6) \quad \rho = \delta + g\nu \quad \text{avec} \quad \nu = -\frac{u''(c_t)c_t}{u'(c_t)}$$

Cette formule fait bien apparaître que le choix du taux d'actualisation n'est pas libre, mais qu'il est endogène au modèle de croissance sous-jacent, tel qu'il est caractérisé par :

- le terme δ ou « taux d'escompte social » : peu observable et souvent appelé « taux de préférence pure pour le présent » (Tppp) ; il est accusé de traduire une impatience pour le bien-être immédiat qui contredirait le souci des générations futures⁽¹⁾ ;
- le terme $g\nu$, ou « effet richesse » ; plus tangible, il indique qu'un euro supplémentaire demain procurera moins de bien-être que ce même euro aujourd'hui si on suppose que la croissance de la consommation sera positive mais que son utilité marginale décroît.

Le tableau 1 résume les principales valeurs trouvées dans la littérature pour chacun des paramètres, ce qui conduit à des taux d'actualisation allant de 1 à 9 %. En fait, toutes ces valeurs ne sont pas également légitimes car toutes les combinaisons de termes δ , g et ν ne sont pas possibles si on veut calibrer un modèle réaliste.

(1) Le fait de donner à δ une valeur particulière véhicule un choix normatif fort : par exemple, Manne (1995) recommande δ entre 2 et 4 % pour faire en sorte que les taux d'épargne optimaux restent proches de leurs valeurs actuelles.

1. Évaluation numérique du taux d'actualisation

	Valeur	Origine
δ	0 % - 4 %	Arrow (1995) et Manne (1995) suggèrent 2 %-4 % afin d'assurer que le taux d'épargne généré par un modèle de croissance soit proche des taux d'épargne observés aujourd'hui dans les pays développés. D'autres auteurs défendent un taux d'actualisation plus faible afin de mieux prendre en compte les intérêts des générations futures (Cline, 1993).
g	1 % - 3 %	Fourchette des taux de croissance annuels moyens entre 2000 et 2100 dans les scénarios SRES (Nakićenović et Swart, 2000).
v	0,8 % - 1,6 %	Évaluations empiriques citées dans Arrow et <i>al.</i> (1996b)
ρ	1 % - 9 %	

2. À la recherche du « bon » taux d'actualisation

2.1. Long terme : la préférence pure pour le présent est elle légitime ?

L'idée qu'il est injuste de donner aux générations futures un poids plus faible qu'aux générations présentes remonte à Ramsey (1928). Mais Koopmans (1960 et 1964) avance un contre argument théorique très fort. Il montre en effet que, si l'on suppose que les préférences des agents sur des plans de consommation intertemporels vérifient cinq axiomes de base⁽²⁾, alors ces préférences sont de la forme (2) avec un $T_{ppp} \delta > 0$. Ce résultat est d'abord dû au fait que l'on cherche à ordonner tous les plans de consommation jusqu'à l'infini sans supposer une utilité bornée : il faut alors que la série des facteurs d'actualisation $\sum q_t$ soit convergente. De plus (critère de stationnarité), le facteur d'actualisation doit décroître exponentiellement, autrement dit δ doit être constant pour éviter que le choix entre plusieurs séquences de consommation futures ne change en fonction de la date à laquelle on les considère.

Outre cette contrainte logique, il apparaît numériquement qu'un T_{ppp} non nul est nécessaire pour obtenir des trajectoires de croissance positives dès les premières générations (Koopmans, 1965) avec des taux d'épargne compatibles avec ceux que l'on observe aujourd'hui. Avec un T_{ppp} nul, les modèles décrivent un schéma « d'accumulation primitive » où les générations présentes sont sacrifiées au bonheur des générations futures. De ce

(2) Complétude, continuité, sensibilité à la première période, non-complémentarité des consommations sur deux périodes successives, stationnarité et existence d'extrema.

point de vue, la popularisation du terme de préférence pure pour le présent en lieu et place du terme de taux d'escompte social est trompeuse puisque δ traduit tout autant une « préférence pour le non-sacrifice du présent ». Mais ceci ne rend pas pour autant illégitime les inquiétudes sur le fait que des T_{pp} élevés sur des horizons temporels longs ne conduisent à préempter le futur.

Pour prévenir ce risque, plusieurs alternatives ont été proposées. Un premier groupe s'articule autour de principes axiomatiques :

- le principe du maxi-min⁽³⁾, qui prône de maximiser l'utilité de la génération la plus désavantagée. Mais introduire un tel critère dans un modèle de croissance aboutit à une croissance zéro (Solow, 1974) : tant que la croissance est positive, il est toujours possible d'augmenter le bien-être de la génération la moins bien dotée, la première, en réduisant son taux d'épargne et l'équilibre n'est atteint que lorsque ce taux d'épargne est nul, donc lorsque la croissance est nulle⁽⁴⁾ ;

- l'axiomatique de Chichilnisky (1996), qui montre que toutes les relations de préférences qui vérifient les deux axiomes de « non-dictature du futur » et de « non-dictature du présent » peuvent être représentées par la somme pondérée d'un critère actualisé (pas forcément à taux constant) et d'un critère qui ne dépend que de la valeur de la consommation à l'infini (2) :

$$(7) \quad \text{Max } \beta \sum_t q_t U(c_t) + (1 - \beta) \Phi(c_\infty) \text{ avec } 0 < \beta < 1, \sum_t q_t < \infty$$

et $\Phi(c_\infty)$ l'unité de la consommation quand $t \rightarrow \infty$

Mais l'introduction de cette fonction dans un modèle de croissance montre qu'elle pose problème. Si les poids q_t sont exponentiellement décroissants, le modèle suit d'abord une trajectoire similaire à celle que l'on obtiendrait avec le seul critère actualisé, puis une trajectoire similaire à celle que l'on obtiendrait avec le seul critère « limite ». Or, cette seconde partie de la trajectoire exige une quantité de capital très élevée afin de maximiser la consommation « à la fin des temps ». Pour constituer ce capital, il faut donc passer par une phase de très forte épargne et de faible consommation⁽⁵⁾ où les générations intermédiaires sont sacrifiées. Avec un T_{pp} décroissant dans le temps, le critère limite domine et le taux d'épar-

(3) Ce critère traduit l'analyse des principes de la justice distributive selon Rawls (1971), c'est-à-dire ceux que concevraient des personnes libres et rationnelles gouvernées par leur intérêt personnel si elles devaient décider des règles et institutions qui encadrent leur vie sociale en étant derrière un « voile de l'ignorance », c'est-à-dire dans l'ignorance de leurs capacités, de leurs conceptions du Bien, de leur position dans la société et du niveau de développement de la société dont elles seront membres. Rawls conclut que, placé dans cette situation, ces personnes choisiraient de maximiser le bien-être de l'individu le plus désavantagé.

(4) Henry (2000) montre qu'une croissance positive peut être obtenue avec un critère mini-max si chaque génération est suffisamment altruiste, au sens où son utilité dépend aussi de l'utilité de la génération suivante.

(5) La date de cette transition dépend de la valeur du paramètre β .

gne s'avère très élevé dès le départ (Beltratti et *al.*, 1996). En définitive, malgré un nouveau paramètre d'arbitrage entre présent et futur (β), le problème du non-sacrifice d'une génération reste entier.

Un second ensemble de réponses vise à prendre en compte de façon plus correcte la manière dont les individus font des choix intertemporels. Les études empiriques montrent en effet que ceux-ci, placés devant des choix intertemporels, ne respectent pas les prescriptions du critère actualisé. On observe les principales « anomalies » suivantes :

- un effet de distance : le taux d'actualisation implicite est d'autant plus faible que le gain ou la perte sont éloignés dans le temps ; au bout d'un certain temps en effet, même si je me préoccupe de mes descendants, la différence entre les 10 et 11^e générations sera forcément inférieure à celle que je fais entre mes enfants et mes petits-enfants (Schelling, 1995) ;
- un effet d'amplitude : des montants élevés sont actualisés à un taux plus faible que des montants faibles ;
- une asymétrie pertes-gains, les gains étant actualisés à un taux plus élevé que les pertes ;
- une asymétrie ralentissement-accélération : rapprocher un gain futur d'un intervalle de temps donné est moins valorisé que le fait d'éloigner ce gain d'un même intervalle de temps (Loewenstein et Prelec, 1992).

Des facteurs d'actualisation « hyperboliques » de la forme $q_t = (1 + \alpha t) - \beta/\alpha$, avec $\alpha > 0$, $\beta > 0$, permettent d'intégrer une partie de ces « anomalies » et rendent mieux compte des observations empiriques sur les choix des individus (Cropper et *al.*, 1994). Que de tels facteurs soient utiles pour étudier le comportement des agents ne fait pas de doute mais, transposés dans un modèle de croissance, ils conduisent à ce que chaque génération épargne moins que les suivantes (Phelps et Pollak, 1968)⁽⁶⁾. Or ceci, qui conduit à des taux d'épargne élevés pour les générations éloignées, semble contredit par l'expérience historique de baisse de ces taux.

Pour rester dans le cadre de notre métaphore initiale, cela pose le problème des garanties selon lesquelles les générations futures respecteront bien le taux d'épargne que leur attribue le décideur. C'est pourquoi Arrow (1999) a introduit l'idée que celui-ci peut simplement faire un pari sur cette valeur et il renvoie à un « jeu » entre générations. Phelps et Pollak montrent alors qu'il existe pour ce jeu un unique équilibre de Nash, caractérisé par un taux d'épargne constant $\hat{\sigma}$, qui n'est pas, en général, Pareto-optimal.

(6) Phelps et Pollak raisonnent sur des coefficients « quasi-hyperboliques » de la forme $q_0 = 1$, $q_t = \frac{\beta}{(1 + \delta)^t}$ pour $t > 0$ avec $0 < \beta < 1$, $0 < \delta$. Les résultats qu'ils obtiennent sont applicables aux coefficients hyperboliques.

Autrement dit, il existe un taux d'épargne $\bar{\sigma} > \hat{\sigma}$ tel que si toutes les générations l'adoptaient, toutes verraient leur utilité augmenter par rapport à un équilibre non coopératif ; mais cet équilibre est instable, car chaque génération a intérêt à adopter un comportement de passager clandestin et à reporter l'effort sur les autres.

Ainsi, le critère quasi-hyperbolique (ou hyperbolique) conduit à une incohérence dynamique des choix en ce sens que des programmes mis en œuvre peuvent se révéler *ex post* moins efficaces que d'autres du simple fait du passage du temps. En supposant maintenant que le planificateur bienveillant intègre les comportements (non coopératifs) attendus des générations futures⁽⁷⁾, le critère hyperbolique aboutit alors à un taux d'épargne constant et à une trajectoire identique à celle résultant d'un critère actualisé classique. Il semble donc que, malgré l'horizon de très long terme qui caractérise le changement climatique, il convienne de conserver un critère actualisé classique, la raison principale étant que ce critère traduit une préoccupation réelle, le non-sacrifice des générations présentes et qu'aucune des alternatives examinées ne s'avère vraiment convaincante. Enfin, comme le bien montre l'équation (6), le Tppp est loin de dicter à lui seul le niveau du taux d'actualisation.

2.2. Taux d'actualisation et hypothèses sur la croissance⁽⁸⁾

On oublie parfois, quand on parle de taux d'actualisation, que celui-ci ne peut être choisi par combinaison arbitraire des trois paramètres δ , g et ν et qu'il importe de l'utiliser, certes pour guider les choix décentralisés, mais aussi au sein d'une vision cohérente du futur⁽⁹⁾. Calibrer par exemple un modèle avec des taux de croissance de 5 % et un Tppp de 4 % implique une hypothèse peu réaliste sur la productivité marginale du capital (9 %) capable d'assurer une croissance rapide malgré une forte préférence pour la consommation immédiate. De plus, cette forte croissance économique conduit à plus d'émissions dans le scénario de base ; les niveaux de concentration entraînant des dommages importants, s'ils existent, sont donc atteints de façon plus précoce, entraînant une progression rapide de la valeur de l'environnement. Si cette forte croissance crée un contexte favorable au progrès sur les techniques économes en carbone, on peut très bien conclure à la nécessité d'une action rapide pour éviter d'aller « dans le mur ». Dit autrement, dans un modèle complet, il n'est pas si aisé d'écraser le long terme si celui-ci est correctement décrit.

(7) Robert Solow se montre ici sceptique : « *Leaving aside all technical points, I have to say this does not feel anything like the way policy is talked about or could be talked about in a democracy, especially since any current generation is notoriously bad at guessing what future generations will want or do* » (Solow, 1999).

(8) Cette section s'inspire en particulier de Heal (2001).

(9) Cette vision cohérente doit bien sûr, dans le cas qui nous occupe, incorporer les incertitudes sur le futur et ne se confond pas avec la définition du scénario le plus probable.

Certes, ces garde-fous n'existent pas quand on raisonne non plus dans le cadre d'un modèle de croissance complet, mais, pour des raisons pratiques, sur la base d'un raisonnement partiel où on s'interroge sur le « bon » taux à retenir. Il faut alors les réintroduire à plusieurs niveaux :

- la formule (6) n'implique pas *a priori* que le taux d'actualisation soit constant, et ceci pour deux raisons. D'abord, il convient de s'interroger sur le réalisme d'un taux de croissance de 3 % par an – à plus forte raison 5 à 6 % – maintenu sur un siècle. À contenu matière constant, ce taux conduirait à multiplier par 19 nos consommations d'énergie et matières premières. En d'autres termes, soit on explicite des mécanismes structurels de dématérialisation (mais à ce moment là, la croissance des émissions se ralentit spontanément et le ratio coût des politiques climatiques/PIB décroît très vite), soit on envisage une saturation progressive de la croissance (vers 1 % par an) et un taux d'actualisation décroissant avec l'horizon temporel⁽¹⁰⁾. On retrouve alors une notion d'actualisation décroissante sans pour autant supposer de préférences hyperboliques ;

- Weitzmann (1998) montre que les incertitudes sur les taux de croissance de long terme, dues par exemple à l'incertitude sur le progrès technique devraient conduire à des taux d'actualisation décroissants avec l'horizon temporel considéré pour la simple raison que, plus le temps passe, plus les états du monde résultant d'un scénario de croissance faible à $t + n$ pèsent davantage que les états du monde à la même date engendrés par une croissance forte qui sont, eux « écrasés » par l'actualisation. Une version simple de la démonstration est donnée par Newell et Pizer (2001) : la valeur actuelle de 100 dollars en 2100 est de 20,28 dollars si on actualise à 1 % et 0,2 dollar si on actualise 7 %, d'où, avec une probabilité de 50 % pour chaque scénario une valeur moyenne de 10,24 ; si, partant de là, on refait le calcul pour 101 ans, on trouve 20,08 (20,28/1,01) et 0,19 (0,2/1,07) respectivement soit une moyenne de 10,13. Or, 10,13 est proche de 10,24/1,01 et tout se passe comme si seul le taux d'actualisation bas comptait (adopter une hypothèse supérieure de 10 % ne changerait pas le résultat). Newell et Pizer montrent alors que traiter les taux futurs comme aléatoires autour d'une moyenne de 4 % conduit à augmenter de 80 % le coût des dommages trouvés par Nordhaus (1994) avec un taux de 4 % considéré comme certain. La raison en est, bien sûr, que, lorsque les taux d'intérêt passent par des cycles bas, le futur se « dévalue » moins rapidement ;

- l'impact de la dégradation de l'environnement sur la productivité des facteurs : en d'autres termes, l'investissement en biens « normaux » sera moins efficace si l'on doit renouveler plus rapidement le capital existant ou pallier une irrégularité accrue des ressources en eau (voir le complément B rédigé par Ambrosi et Hourcade). La difficulté est ici que la formule (6) n'est valide qu'à la marge d'un scénario optimal ; retenir le taux de base du

(10) Newell et Pizer (2001) aboutissent à un résultat similaire en prolongeant la tendance à la baisse des taux de rendement des bons du Trésor américain.

scénario de référence revient donc à admettre implicitement que les dommages sont marginaux. On devrait, en théorie, calculer le scénario optimal par un modèle complet incluant les dommages et leur impact sur la productivité et en dériver le taux d'actualisation à communiquer aux acteurs décentralisés. Or cette opération est hasardeuse en l'état actuel des connaissances. On ne peut donc que procéder par une correction grossière qui reflète les anticipations que l'on a sur le ralentissement de la productivité générale, provoqué par les changements climatiques.

- l'introduction de l'environnement comme source d'aménités pour permettre d'exprimer les préférences pour le maintien de la qualité du climat « tel qu'il est ». On peut soutenir que, de même que, au-delà d'un certain niveau de richesse permettant d'être saturé en biens matériels, on peut « se payer le luxe » d'investir dans des tableaux de maître, de même, l'environnement est un bien « supérieur » au sens où la volonté à payer pour lui croît avec le revenu. On peut représenter cet effet en supposant que l'utilité de chaque génération dépend à la fois de la consommation c et de la qualité de l'environnement s . Dans ce cas, la formule (6) devient (8) ci-dessous, où h est le taux de variation de la qualité de l'environnement au cours du temps, et où $\mu < 0$ traduit le fait que, plus la richesse augmente, plus l'utilité marginale de l'environnement augmente.

$$(8) \quad \rho = \delta + gV + h\mu \quad \text{avec} \quad h = \frac{ds_t/dt}{s_t} \quad \text{et} \quad \mu = - \frac{s_t \partial(\partial u/\partial c)/\partial s}{\partial u/\partial c}$$

Ce qui précède ne permet certes pas de définir le taux d'actualisation à choisir pour l'étude des risques climatiques puisqu'il y a autant de taux qu'il y a de visions du monde plausibles. Mais cela permet de cadrer le raisonnement et d'éliminer quelques fausses pistes, par exemple l'idée qu'il conviendrait de choisir pour taux d'actualisation public des valeurs proches du rendement actuel des portefeuilles (Lind, 1982). C'est la productivité marginale du capital qui compte telle qu'elle est mesurée sur le long terme, compte tenu de taux de croissance plausibles sur un siècle qui ne dépassent pas 3 % par an. Or, sans prétendre que ceci fournit une tendance extrapolable, notons, avec Newell et Pizer (2001) que les bons à long terme du Trésor américain, s'ils ont connu de très fortes variations, font apparaître une tendance baissière qui passe de 6 à 8 % dans les années 1790-1810 à 2 à 4 % depuis 1950 (période 1978 et 1982 exceptée avec une pointe à 6 %)⁽¹¹⁾.

Si l'on considère cette dernière fourchette et si l'on affecte chacun des deux scénarios de probabilités identiques, des dommages en 2100 sont actualisés à un taux de 2,57 % en équivalent certain. Ce chiffre passe même

(11) Ceci rejoint les ordres de grandeurs fournis par Homer et Sylla (1996) qui, ayant recomposé les taux d'intérêt depuis le XI^e siècle montrent une baisse continue depuis le XVII^e siècle avec une fourchette de 4,5 à 12 %, qui passe à 2-6 % au XX^e siècle.

à 1,57 %, si l'on choisit une fourchette de 1 à 3 % pour traduire l'hypothèse d'une poursuite de la tendance baissière des taux intérêt de long terme. À cela on peut rajouter, mais sans qu'on ait encore de bases empiriques pour le faire, des modulations à la baisse pour tenir compte de la préférence pure pour l'environnement et des rétroactions négatives du changement climatique sur la productivité globale.

3. Actualisation, incertitude et décision séquentielle

Comme on vient de le voir, la détermination du taux d'actualisation de long terme ne peut se faire sans tenir compte de l'incertitude sur les scénarios de long terme. En fait, en présence d'incertitudes généralisées, portant aussi bien sur les dommages que sur le contenu du changement technique, c'est la nature même du schéma décisionnel qui doit évoluer, ce qui a de fortes implications sur le statut même du taux d'actualisation, puisqu'on va le voir, celui-ci n'est plus le seul « prix » à considérer dans le calcul intertemporel.

3.1. Incertitudes : au-delà de la maximisation de l'utilité espérée ?

Classiquement, le calcul économique en univers incertain recourt au critère de maximisation de l'utilité espérée pour représenter les choix des agents :

$$(9) \quad \text{Max} \sum_i p_i U(c_i) \quad p_i : \text{probabilité de l'évènement } c_i$$

Les fondements de ce critère, lorsque les probabilités d'occurrence des différents états du monde peuvent être évaluées statistiquement, viennent de Von Neumann et Morgenstern (1947). Lorsqu'on ne peut tirer aucune information de l'expérience passée, Savage (1951) confirme l'utilisation de ce critère en affectant à chaque état du monde une probabilité subjective d'occurrence (Luce et Raiffa, 1957). Ceci constitue un affaiblissement des ambitions initiales, mais n'empêche pas l'utilisation du critère de l'utilité espérée en matière d'effet de serre de se heurter à trois obstacles :

- sa difficulté à rendre compte des comportements réels des agents face à des risques de faible probabilité, mais aux conséquences potentiellement larges (Allais, 1953) ;
- l'existence d'incertitudes dites endogènes, qui dépendent de nos décisions au lieu d'être de simples aléas de la nature : le prix des énergies sans carbone dépend des choix antérieurs de R&D qui, eux-mêmes, dépendent de notre volonté de limiter l'effet de serre ; par exemple, la sensibilité de la réponse climatique dépend de la date à laquelle sont effectuées les baisses d'émissions ou les captures de carbone par les sols où les forêts (Gitz et

Ciais, 2002). Ceci peut conduire à des équilibres multiples à long terme rendant difficile l'application du schéma standard (Kreps et Porteus, 1979) puisque l'état « moyen » peut avoir une probabilité très faible⁽¹²⁾ ;

- il est difficile d'identifier tous les états du monde futurs possibles et de leur attacher une probabilité subjective (tableau 2). Certes des critères de décision ne nécessitant pas des probabilités (par exemple mini-max, mini-max regret ou principe de symétrie) peuvent être envisagés mais ils esquivent l'un des enjeux centraux de la décision en matière d'effet de serre, à savoir la nécessité de coordonner les anticipations d'agents avec des « croyances » différentes et disposant d'informations controversées sur les risques qu'ils encourrent.

2. Probabilités par catégorie d'incertitude sur le changement climatique

Émissions à long terme	Le GIEC fournit un ensemble de scénarios qui définissent un très large univers des possibles ; il considère chacune de ces images du futur comme équiprobable (Nakićenović et Swart, 2000)
Progrès technique	L'information disponible est souvent basée sur une extrapolation de tendances historiques, par exemple le découplage énergie/croissance. Les mécanismes de progrès technique induit restent très difficiles à représenter.
Dommages du changement climatique	Plusieurs auteurs évaluent la distribution de l'augmentation moyenne de la température à scénario d'émissions donné (par exemple Wigley et Raper, 2001 ou Stott et Kettleborough, 2002). Par contre, on n'a pas d'évaluation de la probabilité d'évènements climatiques extrêmes (arrêt de la circulation thermohaline ou augmentation de la fréquence d'évènements de type El Niño).

Source : Auteurs.

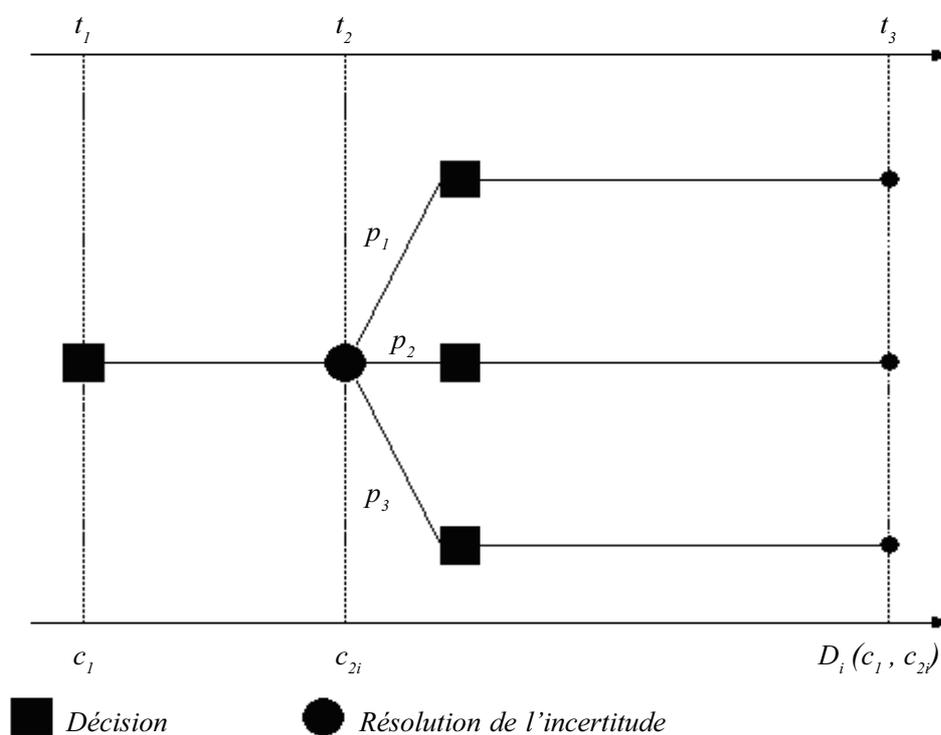
Au total, les alternatives proposées au critère de maximisation de l'utilité espérée aboutissent jusqu'ici à sacrifier la cohérence temporelle des choix (le fait que le simple passage du temps ne change pas la décision optimale, voir Starmer, 2000). Du point de vue de la décision publique, cela constitue une limitation rédhibitoire. C'est pourquoi, « en attendant mieux », il faut tirer tout le parti possible du critère de maximisation de l'espérance de l'utilité subjective qui permet de représenter explicitement les croyances et force à distinguer les énoncés relatifs aux états du monde futur de ceux relatifs aux préférences des agents.

(12) Par exemple dans une étude systématique des paniers technologiques susceptibles d'être engendrés sur le très long terme, en tenant compte des mécanismes d'apprentissage technologiques qui font qu'une technologie a d'autant plus de chance de s'imposer qu'on lui a consacré d'efforts, l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) fait apparaître clairement des discontinuités dans la distribution des probabilités avec accumulations autour des paniers très intensifs en carbone, traduisant une dominance des effets d'apprentissages sur les technologies charbon, et autour des paniers peu émetteurs en carbone, traduisant une prise en compte précoce des risques climatiques, mais une densité de probabilité très faible pour des « paniers moyens » ; il y a là une figure de choix entre deux « lock-in » technologiques.

3.2. Hiérarchisation de l'impact des incertitudes sur la décision de court terme

Dans un contexte de grandes incertitudes, les économistes s'accordent sur la nécessité d'un schéma de décision séquentielle (graphique 2) permettant de réviser les premières décisions en fonction de l'évolution des connaissances sur les risques et de l'expérience directe sur les coûts d'abattement. Logique du point de vue de la rationalité formelle, la séquentialité de la décision permet en outre de prendre en charge des situations où l'essentiel est de trouver un noyau d'accord entre partenaires ayant des visions du monde différentes pour laisser du temps à la résolution de leurs controverses (Hourcade, 1991 et Godard, 1993). Comme l'ont très tôt exprimé Manne et Richels (1992) : « *We do not need to be overly concerned by our inability to predict the detailed character of the energy system several decades into the future. Uncertainty is important only to the extent that it confounds near-term decision-making. Today's decision appear to be relatively insensitive to some of the most controversial long-term uncertainties in the greenhouse debate* ».

1. Schéma simplifié de décision séquentielle

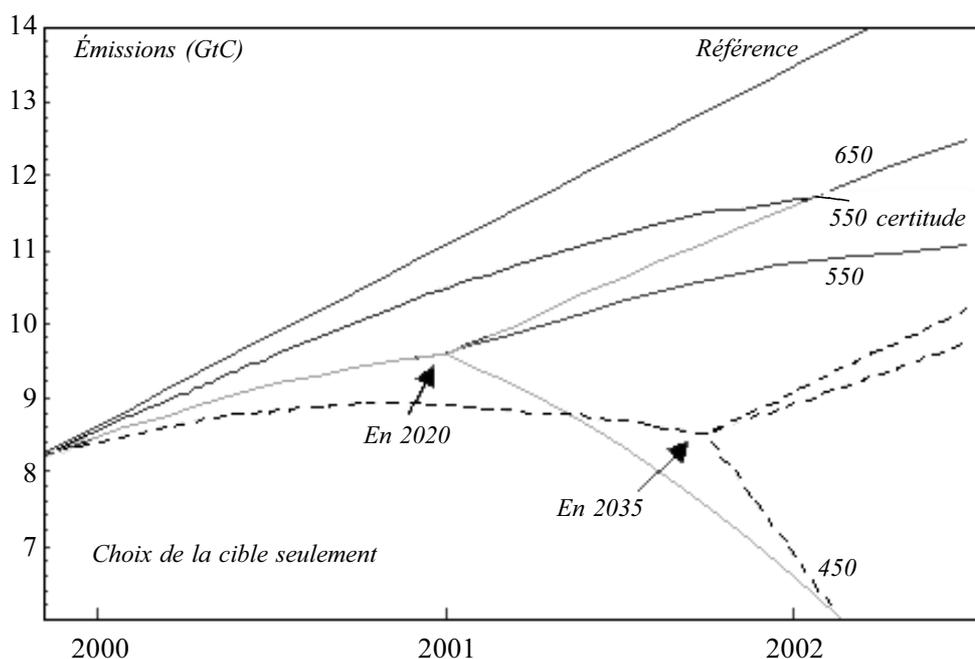


Note : Les carrés symbolisent les décisions et le rond central la date de levée de l'incertitude. Le processus comprend quatre étapes : l'abattement de première période, la révélation de l'état du monde, l'abattement de seconde période et en fin de seconde période les dommages.

Source : Auteurs.

La différence entre calcul économique standard et décision séquentielle peut être illustrée par une métaphore automobile. Soit un conducteur qui ignore s'il va trouver une plaque de verglas dans un virage surplombant un précipice sur une route de montagne, il lâche l'accélérateur, presse légèrement la pédale de frein, prêt à ralentir plus fortement en cas de verglas, à réaccélérer dans le cas contraire. Les risques étant trop contrastés, la distribution de probabilité trop inconnue et l'information utile risquant de venir trop tard en raison de l'inertie du véhicule, le comportement raisonnable n'est alors pas de choisir une trajectoire optimisée une fois pour toute, mais d'opter pour un processus séquentiel où les premières décisions visent à augmenter le temps d'apprentissage et harmoniser vitesse du véhicule et amélioration de l'information (Hourcade, 1994). Pour les risques climatiques, si nous agissons trop peu aujourd'hui, nous risquons de devoir freiner les émissions très brutalement demain, à coût très élevé, en cas de mauvaise surprise. À l'inverse, agir aujourd'hui peut être inutilement coûteux s'il s'avère que les dommages sont finalement moins graves que prévu.

2. Sentiers d'émission^(*)



Note : (*) Selon que l'on vise une concentration de 550 ppm (grisé) ou que l'on suppose 450, 550 et 650 ppm équiprobables avec une information révélée en 2020.

Source : Ha-Duong et al., 1997.

Pour comprendre lequel de ces deux effets l'emporte, Ha-Duong et al. (1997) partent du fait que l'on ignore aujourd'hui lequel de ces trois plafonds 450, 550 et 650 parties par million en volume (ppm) il convient d'adopter, et font l'hypothèse que l'information sera disponible en 2020. La première attitude consiste à faire un pari sur la valeur moyenne de 550 ppm.

Dans ce cas (graphique 2) il n'est nul besoin de baisser fortement les émissions par rapport aux tendances en cours (trajectoire 550 certitude). Une attitude plus rationnelle consiste à tenir ces trois cibles comme équiprobables. Dans ce cas le niveau optimal d'abattement qui minimise l'espérance mathématique des coûts est plus élevé car il faut se tenir prêt à freiner si nécessaire⁽¹³⁾. Or, les coûts du rattrapage du temps perdu en cas de mauvaise nouvelle l'emportent sur les coûts de réductions trop précoces (si la concentration s'avère devoir être stabilisée à 650 ppm). Ce résultat est en outre robuste au choix du taux d'actualisation : alors que viser 550 ppm sans tenir compte de l'incertitude conduit à des réductions en 2020 de 3 % par rapport aux émissions de référence, on trouve des baisses de 9 à 14 % selon qu'on prend un taux d'actualisation de 5 ou 3 %. En dehors de l'inertie du capital, un autre paramètre déterminant est la date d'arrivée de l'information. Si nous sommes plus pessimistes sur les progrès des climatologues, et si la date d'arrivée de l'information est plus tardive, alors le même modèle conclut à un découplage plus marqué.

Cet exercice confirme que le taux d'actualisation devient un paramètre parmi d'autres, à côté de l'inertie du capital et de la valeur de l'information. L'essentiel est en effet de tenir compte de la valeur d'option d'une stratégie (cf. encadré 1), de sa capacité à s'adapter à de nouvelles informations. Mais le raisonnement précédent souffre d'une limite qui est de prendre des cibles absolues que l'on ne peut violer alors que, dans la réalité, en cas d'action trop tardive, les sociétés accepteront un dépassement plutôt qu'un freinage à coût social trop élevé. Il y a donc une fenêtre de tir pour chaque niveau de concentration et le problème de décision est de savoir si on « se donne » *a priori* un jeu de niveaux de concentration ou si on cherche à évaluer les dommages attachés à chacun de ces niveaux.

Dans ce dernier cas, on quitte l'analyse coût-efficacité stochastique où les cibles résultent de choix politiques pour l'analyse coûts-bénéfices, où le rôle du taux d'actualisation semble *a priori* décisif. On compare en effet des impacts éloignés dans le temps avec des coûts immédiats, avec risque « d'écrasement » des premiers. Cependant, on peut montrer (Lecocq, 2000) que le paramètre clé pour la décision est la forme même de la fonction dommages. Les deux graphiques ci-après – produits dans le cadre d'un modèle d'évaluation coût-bénéfice à deux périodes – montrent l'impact de deux fonctions dommages ayant le même impact cumulé (correspondant à des plafonds optimaux de concentration de 450 et 750 ppm) en information parfaite mais l'une étant linéaire l'autre comportant des effets de seuils.

Si les dommages sont linéaires, alors le niveau du taux d'actualisation est décisif puisqu'une action significative en première période est économiquement légitime, avec des taux d'actualisation inférieurs à 3 %, mais

(13) Gollier *et al.* (2000) identifient les conditions analytiques dans lesquelles l'un des deux effets l'emporte sur l'autre, sur la base d'un modèle simple d'accumulation de la pollution sur deux périodes.

s'effondre pour des taux supérieurs à 5 % et pour des taux égaux ou supérieurs à 5 %. On notera que le taux d'actualisation et la pente de la fonction dommage ont le même impact sur la décision, devant l'inertie du système économique. En revanche, si les dommages comportent des épisodes « à effet de seuil », leur existence et la date de leur occurrence deviennent clefs, loin devant le taux d'actualisation et l'inertie de l'économie (graphiques 3a et b) : avec un taux (élevé) de 6 %, l'action de première période reste importante, même si la cible visée est de 650 ppm. En d'autres termes, le futur est moins « écrasé » que ce qu'on pourrait craindre en première analyse et on voit bien que tout se joue sur l'anticipation des dommages ; si les risques climatiques sont réels et si on les affecte d'une prime de risque suffisante, alors l'utilisation de la technique de l'actualisation ne conduit pas à repousser indéfiniment l'action, pourvu que les taux choisis pour le très long terme soient déterminés en tenant compte des garde-fous indiqués dans la section précédente.

1. Valeur d'option

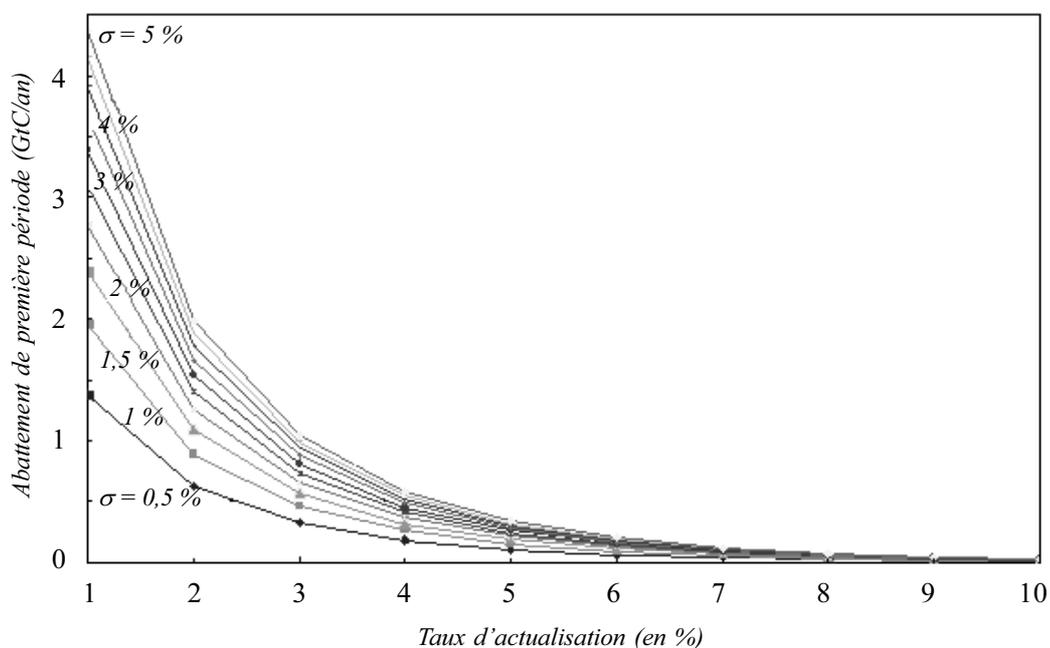
Pour examiner les interactions entre incertitudes et inertie, l'économiste dispose du concept de valeur d'option (ou de quasi-option) développé simultanément par Henry (1974) et Arrow et Fischer (1974). Ces textes fondateurs comparent l'opportunité d'entreprendre immédiatement ou de retarder un investissement irréversible aux conséquences incertaines. Ils montrent que, si une information est susceptible d'être révélée sur les conséquences de cet investissement en seconde période, alors l'intérêt d'attendre augmente par rapport à un monde dans lequel cette information n'est pas révélée. La valeur d'option mesure précisément cet écart.

Le concept a ensuite été étendu à une gamme de problèmes plus large dans laquelle l'information est croissante et les investissements seulement en partie irréversibles (Hanemann, 1989). Dans ce contexte plus général, la valeur d'option se définit comme le biais induit par une analyse coûts-avantages qui ignorerait le fait que l'information peut être croissante, mais ce biais peut maintenant être négatif.

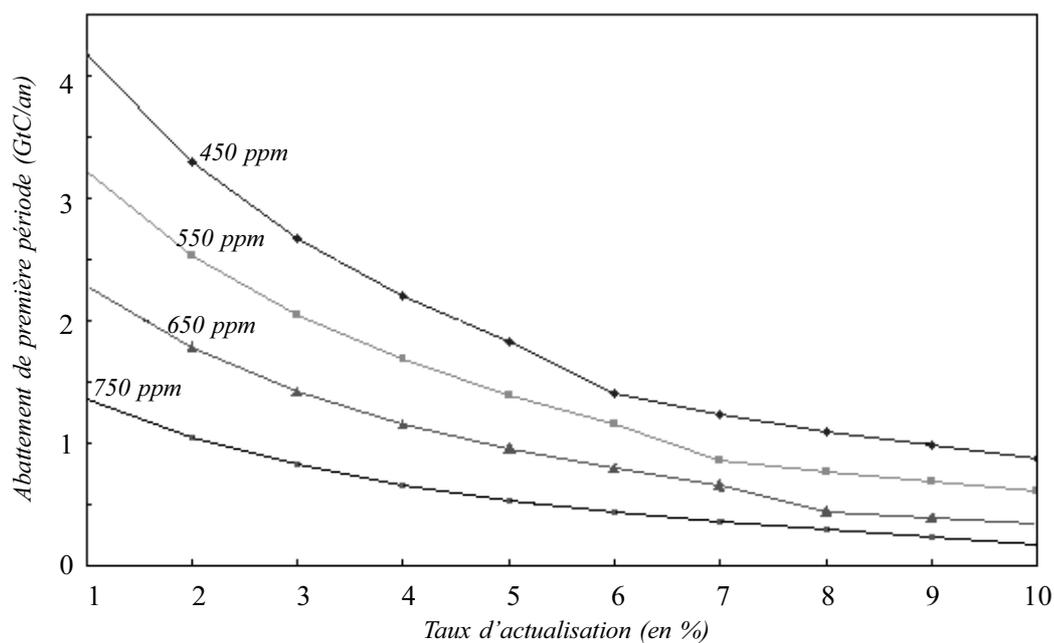
La valeur d'option est un indicateur local qui compare les alternatives deux à deux et constitue un outil particulièrement utile pour rappeler que, si le calcul ne prend pas en compte le fait que l'information est croissante, alors il fournit un résultat inexact. En pratique, il est difficile de chiffrer *ex ante* l'erreur que nous commentons en oubliant l'arrivée d'informations supplémentaires. Cependant, vue l'abondance de travaux de prospective en ces domaines, il est possible d'utiliser leurs résultats comme base de raisonnement ; en le faisant Ha-Duong (1998) estime que « *the magnitude of option value [pour le choix de politiques climatiques] is very significant, about 50% of the cost* » (p. 617).

3. Impact du taux d'actualisation et de la fonction dommage sur la décision de court terme

a. Fonction dommages linéaire(*)



b. Fonction dommages avec effets de seuil



Note : (*) σ représente la pente de la fonction dommages. Lorsque σ varie de 5 à 0,5 %, les concentrations à long terme sont stabilisées entre 450 et 750 ppm.

Source : Lecocq, 2000.

En conclusion, on obtient la hiérarchie suivante pour les incertitudes.

3. Possibilité de dommages « catastrophiques » ?

Oui	Non
1. Seuil de danger climatique	1. Taux d'actualisation Pente de la fonction dommage
2. Inertie du système économique	
3. Taux d'actualisation	3. Inertie du système économique

Conclusion : retour à la question du legs

Nous avons ici essayé de montrer comment la prise en compte du long terme dans le calcul économique pouvait se faire, malgré les risques de mésusages, à partir du concept d'actualisation. On peut résumer en trois points nos conclusions strictement techniques :

- le taux d'actualisation de long terme n'a de sens qu'au sein d'anticipations explicites de la croissance et dans un schéma de décision séquentielle qui permette de tenir compte de la valeur de l'information future ;
- le taux à retenir pour l'étude des politiques climatiques doit tenir compte à la fois de l'incertitude sur les taux de croissance à long terme et du fait que la préservation du climat est un bien auquel on peut attacher une importance croissante au fur et à mesure de l'enrichissement. Il devient dès lors peu légitime d'adopter, pour les pays de l'OCDE, des taux supérieurs à 3 % ;
- les controverses sur le taux d'actualisation sont secondaires pour la décision de court terme, si l'on raisonne sur un jeu de plafonds ultimes de concentration inconnus *ex ante*. Dans ce cas, les paramètres déterminants sont la probabilité attachée au plafond le plus strict et la date d'arrivée de l'information ;
- le taux d'actualisation devient en revanche un paramètre central dans le cas d'une analyse coûts-bénéfices qui valorise monétairement les dommages. Dans ce cas, le point clef est la forme de la fonction dommage ; en présence de phases d'accélération des dommages la valeur de l'environnement croît alors assez vite pour contrebalancer « l'écrasement du futur » que produit l'actualisation.

Au-delà de ces éléments techniques, nous voudrions conclure en élargissant le débat sur l'arbitrage intertemporel. Pour protéger les générations présentes d'une dictature du futur, l'actualisation est un outil important qui n'implique pas nécessairement un sacrifice des générations futures car celui-ci dépend, en dernière instance, de la lucidité des générations présentes sur la réalité des risques. Or, des générations « lucides » n'ont pas à s'interroger seulement sur l'arbitrage à faire entre niveau de concentration et niveau de revenu, arbitrage qui est l'enjeu de l'actualisation. En effet, der-

rière un même niveau de revenu, elle peut léguer à ses descendants plusieurs contenus qui seront déterminants pour leur liberté d'action :

- du capital installé ; adopter une technologie détermine le niveau d'émissions pendant toute la durée de vie de l'équipement (30 à 50 ans pour les centrales électriques, plus pour les logements ou les infrastructures de transport). En cas d'accélération soudaine de l'action par suite d'information alarmiste, la charge de l'effort portera alors sur les seuls secteurs flexibles (industrie) ou sur la consommation courante (Lecocq et *al.*, 1998) ;

- un stock de recherche et développement (R&D) : Gerlagh et Van der Zwaan (2001) montrent que prendre en compte l'induction du progrès technique conduit à doubler le niveau d'investissement optimal sur les énergies renouvelables (Tol pousse à l'extrême le raisonnement dans une parabole résumée dans l'encadré 2). Or l'effort de recherche global dans le domaine de l'énergie s'est considérablement affaibli au cours de la dernière décennie (Edmonds et *al.*, 2000).

L'enjeu consiste ici à prévenir des situations de verrouillage technologique dans des sentiers intensifs en carbone (Arrow, Parikh et Pillet, 1996), comme ceux résultant de la quasi disparition du fret transport ou de villes où la mobilité ne peut être assurée que par la voiture individuelle. Signalons par exemple que la moitié du futur parc immobilier de la Chine en 2015 reste à construire (World Bank, 2002). Le choix de telle ou telle trajectoire dépend donc de décisions qui ne seront qu'en partie déterminées par les taux d'actualisation publics. Une actualisation raisonnée représente donc un progrès pour clarifier les débats sur le tempo des réponses vis-à-vis des risques climatiques et pour harmoniser les politiques publiques entre secteurs ; mais la prise en compte des valeurs d'option pour intégrer les incertitudes sur le futur passera par bien d'autres variables de commande que le seul coût du capital.

2. La parabole de Richard Tol

Tol (1998) considère un monde dans lequel la génération actuelle souhaite que la concentration atmosphérique en CO₂ ne dépasse jamais un plafond relativement bas. Mais les générations futures peuvent avoir un avis différent sur la question et se laisser aller à un plafond plus élevé.

Si la génération actuelle ne tient pas compte de ce risque, la politique optimale à court terme se caractérise alors par une trajectoire d'abattement relativement « douce » et une faible quantité de R&D. Supposant que chaque nouvelle génération a 10 % de chances d'être « laxiste », il conclue que le pourcentage chance de stabiliser les concentrations au niveau souhaité par la première génération n'est que de 13 %.

Supposons maintenant que la génération présente intègre ce risque ; elle doit alors adopter une politique climatique plus agressive. Pour s'assurer une probabilité finale de 40 %, Tol calcule qu'elle doit augmenter ses abattements (de 2 à 6 % environ des émissions de référence en 2020), mais surtout multiplier par un facteur 10 les investissements en R&D afin « d'inciter » ainsi les générations futures à abattre davantage en modifiant les termes de leur analyse coûts bénéfiques.

Références bibliographiques

- Allais M. (1953) : « Le comportement de l'homme rationnel devant le risque : critique des postulats et des axiomes de l'école américaine », *Econometrica*, vol. 21, n° 4, pp. 504-546.
- Arrow K.J. (1995) : « Effet de serre et actualisation », *Revue de l'Énergie*, n° 471, pp. 631-636.
- Arrow K.J. (1999) : « Discounting, Morality and Gaming » in *Discounting and Intergenerational Equity*, Portney et Weyant (dir.), Washington DC, Resources for the Future, pp. 13-22.
- Arrow K.J., W. Cline et alii (1996) : « Intertemporal Equity, Discounting, and Economic Efficiency » in *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Bruce, Lee et Haites (dir.), Cambridge, Cambridge University Press, pp. 129-144.
- Arrow K.J. et A.C. Fischer (1974) : « Environmental Preservation, Uncertainty and Irreversibility », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 88, n° 2, pp. 312-319.
- Arrow K.J., J. Parikh et G. Pillet (1996) : « Decision Making Framework for Climate Change » in *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Bruce, Lee et Haites (dir.), Cambridge, Cambridge University Press, pp. 47-70.
- Beltratti A., G. Chichilnisky et G. Heal (1996) : « Sustainable Use of Renewable Resources », *Nota di Lavoro-Fondazione Enrico Mattei*, n° 70-96, Venise, 27 p.
- Boiteux M. (1969) : « Note sur le taux d'actualisation », *Revue d'Économie Politique*, vol. 79, n° 1, pp. 117-128.
- Chichilnisky G. (1996) : « An Axiomatic Approach to Sustainable Development », *Social Choice and Welfare*, vol. 13, n° 2, pp. 231-257.
- Cline W.R. (1993) : « La lutte contre l'effet de serre », *Finance et Développement*, vol. 30, n° 1, pp. 4-6.
- Cropper M., S.K. Ayedede et P.R. Portney (1994) : « Preferences for Life Saving Programs: How the Public Discounts Time and Age », *Journal of Risks and Uncertainty*, vol. 8, pp. 243-265.
- Edmonds J.A., T. Wilson et R. Rosenzweig (2001) : *Global Energy Technology Strategy: Addressing Climate Change, Initial Findings*, Washington DC, Pacific Northwest Laboratories, Battelle Institute, 60 p.

- Gerlagh R. et B. van der Zwaan (2001) : « Gross World Product and Consumption in a Global Warming Model with Endogenous Technological Change », *IVM Working Paper*, D-01/03, Amsterdam, 36 p.
- Gitz V. et Ph. Ciais (2002) : « Feedbacks of Land Use Change on Future Atmospheric CO₂ Levels », *Global Biogeochemical Cycles*.
- Godard O. (1993) : « Stratégies industrielles et conventions d'environnement : de l'univers stabilisé aux univers controversés », *Collection INSEE Méthodes, Environnement et Économie*, n° 39-41, pp. 145-174.
- Gollier C., B. Jullien et N. Treich (2000) : « Scientific Progress and Irreversibility: An Economic Interpretation of the Precautionary Principle », *Journal of Public Economics*, vol. 75, pp. 229-253.
- Ha-Duong M. (1998) : « Quasi-Option Value and Climate Policy Choices », *Energy Economics*, vol. 20, n° 5/6, pp. 599-620.
- Ha-Duong M., M. Grubb et J-C. Hourcade (1997) : « Influence of Socioeconomic Inertia and Uncertainty on Optimal CO₂-Emission Abatement », *Nature*, vol. 390, pp. 270-273.
- Hanemann M.W. (1989) : « Information and the Concept of Option Value », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 16, n° 1, pp. 23-37.
- Heal G.M. (2001) : *Intertemporal Welfare Economics and the Environment*, Mimeo, 50 p.
- Henry C. (1974) : « Investment Decisions under Uncertainty: The 'Irreversibility Effect' », *American Economic Review*, vol. 64, n° 6, pp. 1006-1012.
- Henry C. (1984) : « La microéconomie comme langage et enjeu de négociation », *Revue Économique*, vol. 35, n° 1, pp. 177-197.
- Henry C. (2000) : « Growth, Intergenerational Equity and the Use of Natural Resources », *Cahiers du Laboratoire d'Économétrie de l'École Polytechnique*, n° 529, 19 p.
- Homer S. et R. Sylla (1996) : *A History of Interest Rates*, Rutgers University Press, New Brunswick, 688 p.
- Hourcade J-C. (1991) : « Décision collectives sous controverses », *Projet*, n° 226, pp. 74-83.
- Hourcade J-C. (1994), « Analyse économique et gestion des risques climatiques », *Natures-Sciences-Sociétés*, 2, (3), pp. 202-211.
- Koopmans T.C. (1960) : « Stationary Ordinal Utility and Impatience », *Econometrica*, vol. 28, n° 2, pp. 287-309.
- Koopmans T.C. (1965) : « On the Concept of Optimal Economic Growth » in *Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia*, 28, Actes de la Semaine d'étude sur l'analyse économétrique dans la formulation des plans de développement, Cité du Vatican, pp. 225-300.

- Koopmans T.C., P.A. Diamond et R.E. Williamson (1964) : « Stationary Utility and Time Perspective », *Econometrica*, vol. 32, n° 1/2, pp. 82-100.
- Kreps D.M. et E.L. Porteus (1979) : « Temporal Von Neumann-Morgenstern and Induced Preferences », *Journal of Economic Theory*, vol. 20, pp. 81-109.
- Lecocq F. (2000) : *Distribution spatiale et temporelle des coûts des politiques publiques sous incertitudes : le cas de l'effet de serre*, Thèse de doctorat ENGREF, Paris, ENGREF, 340 p. Disponible sur www.engref.fr/theselecocq.htm
- Lecocq F., J-C. Hourcade et M. Ha-Duong (1998) : « Decision Making under Uncertainty and Inertia Constraints », *Energy Economics*, vol. 20, n° 5/6, pp. 539-555.
- Lind R.C. (1982) : « Discounting for Time and Risks in Energy Policy », Washington DC, *Ressources for the Future*, 468 p.
- Loewenstein G. et D. Prelec (1992) : « Anomalies in Intertemporal Choice: Evidence and an Interpretation », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 106, n° 2, pp. 181-193.
- Luce R.D. et H. Raiffa (1957) : *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey*, New York, Dover Publications, 509 p.
- Manne A. (1995) : « The Rate of Time Preference: Implications for the Greenhouse Debate », *Energy Policy*, vol. 23, n° 4/5, pp. 391-394.
- Manne A. et R. Richels (1992) : *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of Carbon Dioxide Emission Limits*, Cambridge, MIT Press, 182 p.
- Nakićenović N. et R. Swart (dir.) (2000) : *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change on Emission Scenarios*, Cambridge, Cambridge University Press, 570 p.
- Newell R. et Pizer W. (2001) : *Discounting the Benefits of Climate Change Mitigation*, Pew Center on Global Climate Change, Washington DC, 37 p.
- Nordhaus, W.D. (1994) : *Managing the Global Commons*, Cambridge, MIT Press.
- Phelps E.S et R.A. Pollak (1968) : « On Second Best National Saving and Game Equilibrium Theory », *Review of Economic Studies*, vol. 35, n° 2, pp. 185-199.
- Ramsey F. (1928) : « A Mathematical Theory of Saving », *Economic Journal*, vol. 38, pp. 543-559.
- Rawls J. (1971) : *A Theory of Justice*, Cambridge, The Belknap Press of Harvard University Press, 607 p.
- Savage L.J. (1951) : « The Theory of Statistical Decision », *Journal of the American Statistical Association*, vol. 46, n° 1, pp. 55-67.

- Solow R.M. (1956) : « A Contribution to the Theory of Economic Growth », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, n° 1, pp. 65-94.
- Solow R.M. (1974) : « Intergenerational Equity and Exhaustible Resources », *Review of Economic Studies*, vol. 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources, pp. 29-45.
- Solow R.M. (1999) : « Foreword » in *Discounting and Intergenerational Equity*, Portney et Weyant (dir.), Resources for the Future, Washington DC, pp. vii-ix.
- Starmer C. (2000) : « Developments in Non-Expected Utility Theory: The Hunt for a Descriptive Theory of Choice under Risk », *Journal of Economic Literature*, vol. 38, n° 2, pp. 332-382.
- Stott P.A. et J.A. Kettleborough (2002) : « Origins and Estimates of Uncertainty in Predictions of Twenty-First Century Temperature Rise », *Nature*, vol. 416, pp. 723-726.
- Tol R.S.J. (1998) : « Short Term Decisions under Long Term Uncertainty », *Energy Economics*, vol. 20, n° 5/6, pp. 557-569.
- Von Neumann J. et O. Morgenstern (1944) : *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, 641 p.
- Weitzman M.L. (1998) : « Why the Far-Distant Future Should be Discounted at its Lowest Possible Rate », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 36, n° 3, pp. 201-208.
- Wigley T.M.L. et S.C.B. Raper (2001) : « Interpretation of High Projections for Global-Mean Warming », *Science*, vol. 293, pp. 451-454.
- World Bank (2002) : *Sustainable Development in a Dynamic World: Transforming Institutions, Growth and Quality of Life. World Development Report 2003*, World Bank et Oxford University Press, Washington DC, 250 p.

Complément E

Prix versus quantités : plafonner les coûts pour aller plus loin^(*)

Cédric Philibert

*Agence internationale de l'énergie (AIE),
Division énergie et environnement*

Introduction

Même s'il devait être mis en œuvre par tous les pays qui l'ont approuvé en 1997, le Protocole de Kyoto ne constituerait qu'une toute première étape vers l'objectif « ultime » de la Convention des Nations unies sur les changements climatiques : la stabilisation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Le retrait américain rend un peu plus nécessaire encore de commencer à réfléchir aux traits essentiels d'un accord international susceptible d'engager une action mondiale de plus long terme vers cet objectif. Certains enseignements de la théorie économique peuvent aider à distinguer ce qu'il faudrait conserver du Protocole de Kyoto – les échanges de permis d'émission – et ce qui pourrait être modifié – la nature même des objectifs de court terme – afin d'impliquer tous les pays malgré les incertitudes sur le niveau optimal d'action.

1. L'objectif ultime : une approche globale

En adoptant le Protocole de Kyoto, les pays industriels se sont engagés à réduire leurs émissions de six gaz à effet de serre dans la période 2008-2012 de 5 % en moyenne par rapport à 1990. Les décisions de Bonn et

(*) Les vues exprimées ici sont celles de l'auteur et n'engagent ni le Secrétariat de l'AIE ni aucun de ses pays membres. Ce travail a bénéficié du soutien de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), ainsi que des commentaires de Richard Baron (AIE).

Marrakech en 2001 ont réduit l'ambition initiale, ramenée à – 3 % environ. Le retrait américain et l'annonce d'une nouvelle politique américaine visant à réduire de 17,5 % l'intensité en émissions à effet de serre de la croissance économique américaine conduit à estimer que le total des émissions des pays industriels à l'échéance sera d'environ 10 % plus élevé qu'en 1990. Une autre conséquence de ce retrait est que la fraction des émissions mondiales couverte par un accord international de réduction tombe de plus de la moitié au tiers environ.

Cependant, même si le protocole originel pouvait être mis en œuvre sans restriction, son effet sur l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre serait faible : la concentration en gaz carbonique (CO₂) atteindrait 382 parties par million en volume (ppm) en 2010 au lieu de 384 environ sans Kyoto (Bolin, 1998). Un tout premier pas, qu'il convient absolument d'amplifier et d'élargir pour atteindre l'objectif de la Convention.

Pour stabiliser la concentration de CO₂, il faut au minimum diviser par deux, puis par dix, les émissions mondiales. Ceci est vrai quel que soit le niveau de stabilisation désiré : le rythme de réduction des émissions de CO₂ déterminera le niveau de concentration atmosphérique atteint. Or, précisément, le niveau à atteindre pour les concentrations de gaz à effet de serre, tout comme le calendrier, sont deux questions laissées en blanc par la Convention, et que les négociations récentes n'ont pas davantage abordées. Il s'agit de savoir quel niveau de concentration de gaz à effet de serre est susceptible d'entraîner des perturbations anthropiques « dangereuses » – mais cette « dangerosité » n'est nullement définie. La Convention invoque un « délai suffisant » qui peut aussi bien signifier que les changements climatiques et l'action de réduction des émissions ne doivent pas mettre en péril le développement économique.

Autrement dit, il conviendrait de procéder à une analyse coûts-bénéfices rigoureuse des politiques de lutte contre les changements climatiques afin de définir le niveau (et donc le délai) de concentration de gaz à effet de serre à atteindre. *A contrario*, s'il était possible de préciser l'objectif à atteindre sans considération de coût, on voit mal pourquoi ne pas viser à stabiliser les concentrations aux niveaux actuels – voire à revenir aux niveaux préindustriels. Le changement climatique est en cours et produit déjà certains effets néfastes – il n'est déjà plus sûr que les récifs de coraux, par exemple, seront à même de « s'adapter naturellement ». Mais bien entendu, le coût économique et social qui résulterait d'une réduction immédiate de moitié des émissions de dioxyde de carbone serait considérable – à la mesure de l'importance du rôle des énergies fossiles aujourd'hui. Charbon, pétrole et gaz assurent en effet quelque 80 % de la fourniture globale d'énergies commerciales, et leur combustion entraîne un pourcentage à peu près égal des émissions mondiales de CO₂.

Le problème est qu'une analyse coûts-bénéfices du niveau de stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre est impossible à conduire. Côté bénéfices, il convient de rappeler tout d'abord l'incertitude scientifique sur l'ampleur et le rythme du changement climatique. Les conséquences régionales et locales probables d'un réchauffement global restent entachées de nombreuses incertitudes. Il est encore plus malaisé de leur attribuer une valeur actuelle. En effet, les dommages évitables se situent dans un futur plus ou moins lointain, et la procédure de l'actualisation tend à leur donner une valeur présente dérisoire. Les actifs naturels (espèces, écosystèmes) ni substituables ni reproductibles devraient voir leur valeur croître au fil du temps à un rythme proche du taux d'actualisation et donc dominer l'évaluation des dommages évitables (voir Philibert, 1999 et Neumayer, 2001). Malheureusement, ces valeurs ne se révèlent que peu sur des marchés et leur estimation est donc particulièrement difficile.

Côté coûts, les incertitudes sont sans doute moins grandes. Elles n'en restent pas moins importantes. Les scénarios d'émissions « *business-as-usual* » du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) se caractérisent par une grande dispersion. Les coûts des technologies énergétiques sans carbone à échéance de trente, cinquante ou cent ans nous sont inconnus. De plus, ces coûts sont à chaque instant en partie dépendants des politiques suivies, du fait des économies d'échelle et effets d'apprentissage. Difficile, dans ces conditions, de chiffrer précisément les coûts de trajectoires compatibles avec divers niveaux de stabilisation. C'est notamment pour cela que le GIEC s'est toujours refusé à formuler une préconisation précise relative à l'objectif ultime de la Convention. Non seulement le GIEC considère à juste titre que de telles décisions sont *in fine* politiques, mais plus encore il suggère qu'elles seraient prématurées : « Le processus de décision en matière de changement climatique est un processus séquentiel dans un contexte d'incertitude générale. (...) La littérature suggère une résolution par étapes visant à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre. Cela impliquera aussi de soupeser les risques d'une action excessive ou insuffisante. La question pertinente n'est pas 'quel est le meilleur chemin pour les cent prochaines années' mais plutôt 'quel est le meilleur chemin pour le court terme étant donné les changements climatiques attendus à long terme et les incertitudes qui l'accompagnent' ». (IPCC, 2001).

Si nous agissons trop peu, la double inertie des sociétés industrielles et du climat peut nous conduire à des niveaux de concentrations de gaz à effet de serre insupportables et peu réversibles. Si nous agissons trop vite et trop fort nous pourrions payer trop cher un avantage environnemental trop mince. Comment résoudre ce dilemme ? Une solution consisterait à opter pour un objectif de concentrations de gaz à effet de serre « le plus bas possible », tout en acceptant qu'il ne soit pleinement atteint que sous condition de coût. En d'autres termes, l'objectif serait défini en fonction d'hypothèses optimistes quant aux coûts des énergies sans carbone mais la pleine réalisation des objectifs de court terme compatibles avec la trajectoire d'émis-

sions ainsi définie dépendrait des coûts réels rencontrés en chemin. En réalité, et très légitimement, c'est l'objectif ultime qui serait ainsi lui-même révisé à la hausse si les coûts pour l'atteindre s'avèrent plus élevés que prévus.

Une dimension inévitable d'une telle approche est la nécessité d'une incorporation rapide des pays en développement dans le cadre global d'action. Même si les pays industriels (y compris les États-Unis) ramenaient leurs propres émissions à néant, la poursuite à l'identique de la croissance actuelle des émissions du monde en développement ne permettrait pas d'atteindre à la stabilisation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre – et moins encore à un niveau relativement faible tel qu'envisagé ici. Il conviendra donc d'examiner les options pour des engagements futurs de ces pays susceptibles de rendre ceux-ci attractifs – et à tout le moins tels qu'ils ne seraient pas perçus comme une contrainte supplémentaire au développement économique et à l'éradication de la pauvreté.

2. Les engagements de court terme : une approche marginaliste

Devant l'ampleur du problème du changement climatique et le coût potentiel des stratégies de réponse les instruments économiques se sont rapidement imposés. Taxes et permis négociables permettent de répartir l'effort de réduction là où il est le moins coûteux. Cette efficacité économique est souvent présentée comme permettant simplement d'atteindre un objectif environnemental quelconque au moindre coût pour la société. Dès lors que l'objectif de long terme ne peut être fixé à l'avance, on conviendra que dans une approche dynamique où les leçons d'une période servent à déterminer le niveau d'effort des périodes ultérieures, l'efficacité économique devient une clé de l'efficacité environnementale du dispositif. Elle permet d'atteindre l'objectif environnemental le plus ambitieux pour un coût donné – celui que nos sociétés accepteront de payer pour parer aux menaces des changements climatiques.

2.1. Taxes *versus* permis

Mais convient-il de préférer les taxes ou les permis négociables ? De nombreux éléments peuvent entrer en ligne de compte. Les taxes sont souvent impopulaires, et peuvent affecter la profitabilité des entreprises fortement consommatrices d'énergie en concurrence avec celles d'une zone non taxée. Conserver une incitation forte à la marge tout en exemptant ces entreprises d'une part essentielle des taxes apparaît délicat. Avec les permis, on peut plus facilement combiner allocations gratuite et payante – l'allocation gratuite préservant cette profitabilité et l'allocation payante permettant, comme avec les taxes, un certain « double dividende » par réduction

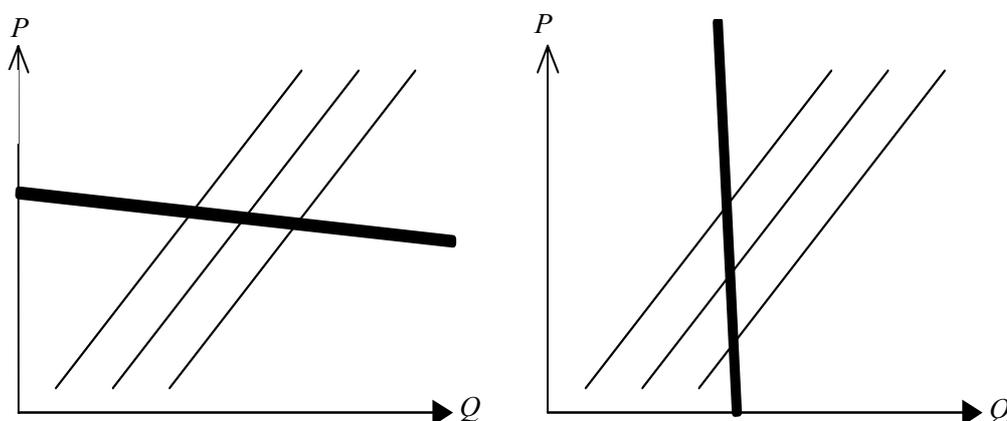
d'autres taxes pesant par exemple sur l'emploi⁽¹⁾. On estime souvent que les permis ne peuvent concerner que les grandes entreprises et que les taxes s'imposent pour les émetteurs dispersés, cependant rien n'interdit de concevoir un système de permis « amont » dans lequel c'est l'introduction du carbone dans l'économie nationale qui est régulée. Par ailleurs, pour atteindre une efficacité économique mondiale il conviendrait d'adopter partout le même niveau de taxes. Cependant, un tel schéma se heurte d'abord aux souverainetés nationales mais plus sûrement encore aux différences de volonté et de capacité à payer – d'autant plus grandes que notre monde reste profondément marqué par de très importantes inégalités de revenus. L'avantage considérable des échanges de permis c'est de permettre une dissociation de l'efficacité et de l'équité – en clair, de permettre une répartition acceptable des coûts entre nations puis de redistribuer les efforts de réduction réels là où ils sont les moins coûteux.

Pourtant, si l'on met pour un moment entre parenthèses la division du monde en près de 200 nations souveraines et qu'on examine le choix entre taxes et permis comme le ferait un décideur unique (un gouvernement mondial) – alors il conviendrait de choisir sans hésiter les taxes. En effet, d'un point de vue économique, si les coûts d'abattement sont connus, les deux types d'instruments sont équivalents. Définir un objectif quantifié revient à définir un coût, définir un niveau de taxation permet de connaître le niveau d'émissions qui en résultera. Si les coûts d'abattement sont inconnus ou incertains, on sait depuis Martin Weitzman (1974) que le choix repose essentiellement sur une comparaison des pentes des courbes de coûts et de bénéfices au voisinage de l'optimum supposé. Une pente plus forte de la courbe des coûts appelle le choix d'instruments basés sur les prix, une pente plus forte de la courbe des bénéfices appelle le choix d'instruments basés sur les quantités.

La figure 1 illustre ce raisonnement. Une pente forte de la courbe de bénéfices marginaux (à droite) signifie que le dommage augmente rapidement avec le niveau de pollution. Il vaut alors la peine d'acquiescer une certitude sur le niveau de pollution, plutôt que de risquer de souffrir d'un dommage environnemental trop important. Si, au contraire, la courbe de bénéfice marginal est proche de l'horizontale (à gauche), le dommage s'accroît lentement avec le niveau de pollution. Il est alors préférable d'acquiescer une certitude sur le coût marginal de réduction des émissions, plutôt que de risquer de payer trop cher un bénéfice environnemental supplémentaire trop petit.

(1) La possibilité d'un double dividende a été remise en cause, en particulier à partir de modèles économiques d'équilibre général. Supposant acquis le plein emploi, ceux-ci peuvent en effet difficilement mettre en évidence un bénéfice pour l'emploi. Le consensus est cependant très large dans la classe politique pour attribuer une part de responsabilité dans le haut niveau de chômage en France aux charges et impôts, et devrait donc être aussi important en faveur de la possibilité d'un double dividende grâce à la fiscalité écologique.

1. Prix versus quantités selon Weitzman



Lecture : P pour prix, Q pour quantités de réductions d'émissions. L'origine représente le niveau incontrôlé d'émissions. La ligne épaisse représente le coût marginal des dommages, c'est-à-dire le bénéfice marginal de la politique examinée, les trois autres lignes représentent trois possibles courbes de coûts marginaux en contexte d'incertitude (au milieu, la « meilleure estimation »).

Source : Weitzman, 1974.

Dans le cas du changement climatique, les coûts dérivent des réductions d'émissions, tandis que les bénéfices dérivent des concentrations. Étant donnée l'importance du stock actuel de gaz carbonique dans l'atmosphère (760 GtC) par rapport aux émissions anthropiques annuelles (environ 8 GtC), les concentrations changent lentement. Il est donc très probable que durant n'importe quelle courte période, les coûts marginaux croissent plus vite que les bénéfices marginaux. Diverses études – notamment celle de Newell et Pizer (2000) – ont suggéré que même en tenant en compte de tous les effets à long terme des réductions d'émissions⁽²⁾, les taxes sont largement préférables aux permis. On peut bien entendu discuter les valeurs retenues pour les principaux paramètres dans ces travaux, cependant ces résultats semblent relativement robustes car il faudrait des dommages climatiques coûtant plusieurs milliers de fois plus que les estimations pour renverser la préférence pour les taxes.

L'intuition confirme ce résultat : selon l'analyse de Bert Bolin rappelée ci-dessus, la pleine réalisation du Protocole de Kyoto réduirait au mieux de 2 ppm la concentration en CO_2 attendue en 2010. Quel que soit le coût marginal du changement climatique résultant d'une tonne supplémentaire de CO_2 , il est simplement difficile de concevoir qu'il puisse être très différent au voisinage de 384 ppm et au voisinage de 382 ppm.

(2) Newell et Pizer modifient l'analyse de Weitzman pour tenir compte des effets des réductions d'émissions au cours d'une période sur les périodes suivantes. Ces correctifs augmentent la valeur de l'instrument quantitatif – mais sont loin de pouvoir renverser la préférence pour les prix dans le cas du changement climatique.

Une autre possibilité bien sûr serait que le coût des dommages climatiques s'accroisse soudain très rapidement – dans le cas de « mauvaises surprises », changements climatiques non linéaires comme l'interruption des courants océaniques ou la fonte des calottes glaciaires. Le GIEC estime « très faible » la probabilité actuelle de tels événements mais elle augmenterait dans le futur avec l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Cependant, si l'on estime que des dommages aussi importants sont possibles, alors il convient de choisir non seulement un instrument quantité mais aussi de réduire très vite les émissions mondiales afin de stabiliser les concentrations de CO₂ à un niveau proche de leur niveau actuel. Une analyse de sensibilité conduit en effet Newell et Pizer à estimer que les quantités deviendraient préférables si les réductions à court terme étaient égales ou supérieures à 40 % des émissions mondiales. Autrement dit, les quotas sont cohérents avec des réductions très fortes. Si la communauté internationale choisit un rythme de réduction moins rapide, alors il vaudrait mieux choisir des instruments basés sur les prix.

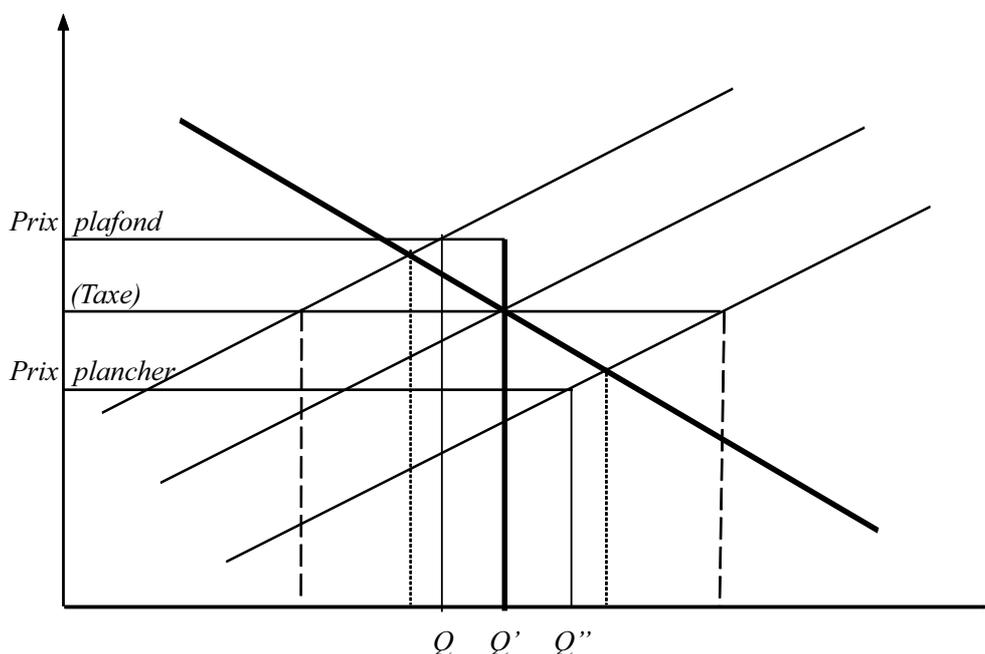
2.2. Les instruments hybrides

Dès 1976, Roberts et Spence montraient qu'un instrument hybride, constitué d'un objectif quantitatif assorti d'un prix plafond et d'un prix plancher, est généralement préférable à l'un ou l'autre des instruments purs. Si les coûts sont plus faibles que prévus, l'État verse une subvention pour acquérir un surcroît de réduction d'émissions. Si les coûts sont plus élevés que prévus, l'État met en vente des permis supplémentaires au prix plafond.

Un tel instrument permet de mieux s'approcher de la courbe des bénéfices marginaux. Que les coûts soient plus élevés que prévus ou plus faibles, on reste toujours plus proche de la réduction optimale qu'on aurait pu l'être avec une quantité seule ou une taxe seule (voir figure 2). L'instrument hybride se ramène à la taxe si les coûts sont parfaitement constants, et se ramène à la fixation d'une simple quantité si les coûts sont en un point quelconque infinis.

Ceci étant, les analystes qui ont préconisé une sorte d'hybride s'en sont jusqu'alors tenus à plaider pour l'introduction d'un prix plafond, une « soupe de sécurité » – jamais pour celle d'un prix plancher (outre Newell et Pizer, Aldy et *al.*, 2001 et Jacoby et Ellerman, 2002). Cette répugnance à envisager une subvention au-dessous d'un prix plancher peut être inspirée par le sentiment d'une infaisabilité politique au plan international. Elle peut plus sûrement reposer sur la critique économique de l'utilisation de subventions comme instruments de lutte contre la pollution. Des subventions risquent en effet, tout en réduisant les émissions des entreprises individuelles d'un secteur économique quelconque, de ne pas réduire et même d'augmenter les émissions totales de ce secteur (voir Baumol et Oates, 1988). Force est alors de réfléchir à la conception d'un système hybride asymétrique – composé d'un objectif quantifié et d'un prix plafond, mais sans prix plancher.

2. L'instrument hybride de Roberts et Spence



Lecture : Selon les coûts réels, la quantité émise se situera en Q , Q' ou Q'' – dans ces derniers cas plus près des quantités optimales correspondantes (indiquées par les lignes pointillées) que les quantités qu'on aurait obtenues avec un objectif fixe (Q) ou avec une taxe (lignes discontinues).

Source : Roberts et Spence, 1976.

Le problème est le suivant : si l'objectif quantifié est fixé sur la meilleure estimation de coût, le risque de sous-investissement dans la politique environnementale, au cas où les réductions d'émissions s'avèreraient moins coûteuses que prévu, n'est pas corrigé, du fait de l'absence de prix plancher. Il convient donc d'opter pour une politique plus ambitieuse – une quantité d'émissions inférieure – afin de corriger ce risque (Cournède et Gastaldo, 2002). Cette politique plus ambitieuse peut être dimensionnée pour fournir un bénéfice espéré au moins égal à celui que fourniraient des objectifs fixes, mais pour des espérances de coûts inférieures.

L'avantage économique d'un tel instrument par rapport à une simple taxe est sans doute peu important lorsque la courbe des bénéfices marginaux est très plate, comme c'est le cas – au cours de toute période courte – avec le changement climatique. Mais celle-ci, on l'a dit, n'est pas vraiment une option dans un monde divisé et inégal. Seuls les systèmes de quotas permettent, au travers des échanges d'émissions, de faire financer les réductions peu coûteuses des pays pauvres par les pays riches.

3. Le prix plafond

Nous allons maintenant examiner la mise en œuvre pratique du concept de prix plafond – ce qui nous amènera à distinguer le cas des pays industriels de celui des pays développés.

En pratique, un prix plafond peut prendre simplement la forme de permis d'émissions supplémentaires en quantité illimitée, vendus à prix fixe. Autrement dit, c'est une taxe sur toute émission au-delà des quotas. Reste à savoir qui peut vendre ces permis, à quel prix, et ce qu'il conviendrait de faire des fonds éventuellement recueillis.

3.1. Le niveau de prix

Le prix plafond doit être choisi dans la moitié supérieure des estimations de coûts de réduction associés à l'objectif quantifié global choisi. Ainsi, c'est seulement si les coûts réels sont plus élevés que prévu que le prix plafond conduira à relâcher l'objectif quantifié. Dans tous les autres cas, le prix plafond ne sera simplement pas activé. Le besoin d'harmonisation est évident : si deux pays pouvant échanger leurs permis sans restriction disposent de prix plafond différents, le pays avec le prix plafond le plus bas sera incité à vendre ses permis à un prix supérieur à son prix plafond, puis à compenser le surcroît d'émissions en achetant des permis supplémentaires au prix plafond. Non seulement le prix le plus bas s'imposerait comme le seul, mais de plus le système profiterait largement au pays avec le prix le plus bas. Cependant, on peut concevoir des échanges entre deux pays avec des prix plafonds différents avec certaines restrictions. Il suffirait en réalité de s'assurer que le pays avec le prix le plus bas ne revend pas plus cher des permis achetés au prix fixe, c'est-à-dire qu'il ne vend que si ses émissions réelles sont effectivement inférieures à la quantité qu'il a reçue initialement. Autrement dit, un pays ne pourrait être à la fois vendeur et acheteur. Nous verrons plus loin comment une telle idée peut s'avérer utile pour intégrer les pays en développement dans la lutte contre le changement climatique.

On n'imagine pas pour autant que chaque pays soit doté de son propre prix plafond : le système d'échange mondial de permis deviendrait alors excessivement complexe. Une harmonisation du prix plafond entre pays de niveaux de développement relativement comparables serait très souhaitable. Est-elle possible ? Certains analystes ont estimé que négocier un prix plafond unique serait un « cauchemar » dès lors qu'un consensus est nécessaire (Müller et *al.*, 2002). Cependant, la volonté à payer des pays se reflète avant tout dans un concept comme celui du niveau d'effort (les coûts totaux exprimés en proportion du PIB) plutôt que dans celui de coût marginal. Tandis que le prix plafond limite le coût marginal de l'effort global, les coûts totaux de chaque pays et donc leurs niveaux respectifs d'effort seront davantage influencés par leurs engagements quantifiés – et ceux-ci peuvent être largement différenciés entre pays. Par ailleurs, la négociation d'un prix

plafond entraîne une complication dans la négociation, mais son existence peut faciliter la négociation des quantités allouées à chacun en réduisant les risques économiques associés, si bien qu'au final il est difficile de dire si un prix plafond accroîtra ou réduira la difficulté globale des négociations futures.

3.2. Que faire des fonds ?

On a parfois suggéré que les achats éventuels de permis supplémentaires au prix plafond devraient permettre une « restauration » complète de « l'intégrité » environnementale de l'accord, en achetant des réductions d'émissions supplémentaires en quantité suffisante. Mais c'est impossible par construction, car il ne resterait nulle part de réductions d'un coût inférieur si l'accord est global. Si ces fonds sont utilisés pour financer des réductions supplémentaires, celles-ci seront progressivement plus coûteuses – et en principe leur coût sera supérieur au bénéfice marginal qu'elles procureraient. Au mieux, ces fonds permettraient de réduire un peu l'écart entre le niveau global d'émissions et l'objectif initial, ce qui pourrait rendre le prix plafond plus acceptable pour certains.

Un autre usage possible de ces fonds serait de financer l'adaptation. Le prix plafond ne saurait être loin de ce que nous pensons être le coût de l'externalité due au changement climatique. Quand l'adaptation est possible, son coût peut être considéré comme une approximation du coût de l'externalité elle-même. Le prix plafond représente alors le niveau au-dessus duquel l'argent est mieux utilisé pour financer l'adaptation que pour réduire davantage les émissions. On peut donc plaider que cet argent devrait venir gonfler le Fonds pour l'adaptation créé par l'accord de Bonn.

Un autre usage intéressant serait le financement d'efforts coordonnés pour accélérer le développement et la dissémination de technologies sans carbone spécifiques. Il s'agirait moins de restaurer l'intégrité à court terme de l'accord que de participer directement à l'un de ses plus importants objectifs – rendre disponibles à coûts acceptables les technologies qui seront nécessaires au cours des périodes suivantes pour accomplir des réductions bien plus importantes.

3.3. Une mise en œuvre commune ou simplement coordonnée ?

Il y a deux façons distinctes d'envisager le prix plafond. Celle qui vient le plus spontanément à l'esprit est sans doute l'achat par les pays de permis supplémentaires au prix plafond, qui seraient mis en vente par une institution internationale (on pense par exemple au Fond pour l'environnement mondial). Pourtant, le concept ne nécessite pas que les pays paient, mais plutôt que les agents économiques seront confrontés à ce prix – qui pourrait être payé à chaque gouvernement. Le prix plafond pourrait prendre la forme de pénalités domestiques en cas de non-conformité. Les fonds pourraient

alors être utilisés pour financer la recherche de technologies sans carbone au niveau du pays ou pour réduire d'autres taxes, ou pour tout autre objet. Un tel schéma suppose toutefois que tous les émetteurs potentiels soient régulés au travers d'un système de permis « amont » (le permis est nécessaire pour introduire des combustibles fossiles dans l'économie) ou que les émetteurs qui ne seraient pas régulés par un système de quotas le soient par une taxe carbone située au même niveau que le prix plafond. En définitive, ceci pourrait bien être aussi difficile à négocier que des taxes carbone domestiques coordonnées au plan international.

3.4. Un prix plafond nul pour les pays en développement

On n'imagine pas les pays en développement s'accorder avec les pays riches sur un prix unique qui représenterait le coût marginal de l'effort – à moins d'être certains de se voir accorder d'emblée des quantités de permis supérieures à leurs besoins, y compris avec les hypothèses de croissance économique les plus optimistes. D'où l'idée d'engagements « non contraignants » pour les pays en développement (Philibert, 2000). Avec un tel système, le pays en développement peut émettre plus que son quota, mais il est incité à ne pas le faire par la perspective de pouvoir vendre au prix international son surcroît de permis d'émissions si ses émissions réelles sont inférieures à son quota. Pour éviter la tricherie, plusieurs systèmes sont concevables, le plus séduisant étant sans doute la responsabilité limitée aux permis vendus, complétée par la réserve de période d'engagement instituée par les accords de Bonn et Marrakech (Philibert et Pershing, 2001 et OCDE/AIE, 2001). En fin de compte, ces engagements non contraignants ne constitueraient rien d'autre que l'application aux pays en développement du concept de prix plafond – celui-ci étant nul.

Il faut souligner qu'un tel concept, s'il n'assure pas la participation effective des pays en développement (PED), la facilite cependant grandement : de tels engagements ne risquent jamais de devenir une contrainte sur le développement économique, raison première du refus des PED de s'engager. Plus simplement, on discutera avec les PED de la taille d'un avantage, non de l'ampleur d'un risque économique – et c'est probablement la seule façon d'obtenir l'adhésion des pays en développement sans ajouter de grandes quantités d'air chaud, c'est-à-dire de surplus de droits d'émissions, dans le système. On notera que cette proposition ne nécessite pas un improbable accord sur un schéma à long terme explicite de répartition des émissions entre pays. Toute tentative d'aller plus ou moins rapidement vers une distribution de droits à émettre sur une base égalitaire par habitant risque d'entraîner pour les pays industriels des coûts bien supérieurs à ceux requis pour la stabilisation des concentrations. Il leur faudrait en effet « racheter » l'air chaud ainsi généreusement alloué aux pays en développement, et ce à un prix qui dépendra du niveau de réduction globale des émissions entrepris. A supposer même qu'un tel schéma soit acceptable dans son principe, son risque évident serait de freiner l'action contre les changements

climatiques – la disponibilité à payer des pays riches n'étant pas élastique à l'infini. En revanche, le concept d'engagements non contraignants postule qu'une base possible pour un accord est que les pays en développement – du moins la plupart d'entre eux, ceux dont le revenu par tête est clairement inférieur à celui des moins bien lotis des pays développés – n'auraient rien à payer au titre de l'atténuation des changements climatiques. Bref, il s'agit moins de répartir des droits à émettre que de répartir des coûts de réduction des émissions – et d'en dispenser les plus pauvres (voir IEA, 2002).

4. Les objectifs dynamiques

L'option du prix plafond, pour séduisante soit-elle, n'est toutefois pas la seule. Dans une certaine mesure, des objectifs « dynamiques », indexés sur la croissance économique, sont également capables d'ajuster en souplesse le niveau d'effort aux coûts réels des politiques suivies – notamment dans la mesure où ces coûts dépendent partiellement de l'ampleur des réductions nécessaires pour atteindre un objectif fixe fonction d'un scénario de référence qui est, lui, incertain. Selon cette option, les émissions ne sont pas plafonnées en termes absolus. Des montants alloués sont définis *a priori* sur la base d'une prévision de croissance, puis ajustés en fin de période en fonction de la croissance réelle.

Les objectifs dynamiques ou indexés sur la croissance économique ont d'abord été suggérés comme une solution pour intégrer les pays en développement, notamment par Frankel (1997), puis Baumert et *al.* (1999). En 1998, l'Argentine proposait d'adopter un engagement de ce type. Enfin, l'annonce de la nouvelle politique des États-Unis vis-à-vis du changement climatique, qui repose sur un « objectif intensité », pose la question de l'adoption de ce type d'objectifs par les pays industriels.

Les objectifs dynamiques permettent une différenciation étendue entre pays. Elle peut porter sur les quotas d'émissions eux-mêmes mais aussi sur la formule d'indexation. Un « objectif intensité » représente un cas extrême : l'objectif est exprimé par un ratio fixe, celui des émissions par rapport au PIB, ce qui nécessite un ajustement de la quantité allouée au départ strictement proportionné à l'écart du PIB par rapport à la prévision. Si Lisowski (2002) défend le principe des objectifs « intensité » pour tous pays, rien n'interdit de prévoir que si le PIB est supérieur ou inférieur de 10 % à la prévision, le montant assigné sera ajusté de 8, ou 5 ou 2 %. On peut préférer une indexation « moins que proportionnelle » des montants alloués – sans aller jusqu'à l'autre extrême, qui nous ramènerait aux objectifs fixes. En effet, en cas de croissance économique plus forte que prévu, il y aura sans doute une accélération de la rotation du stock de capital fournissant plus d'occasion de réductions bon marché. Surtout, en cas de récession ou de faible croissance, les besoins énergétiques de base de la population ne

diminueront pas, au contraire de ceux qui sont relatifs aux activités économiques. Des pays encore faiblement industrialisés devraient se voir accorder une augmentation relative d'intensité énergétique en cas de récession, afin d'éviter le risque souligné par Müller et al. (2002) de voir les objectifs climatiques « doubler la peine ». Il est toutefois possible que les objectifs dynamiques offrent aux pays en développement une protection jugée insuffisante contre les risques économiques, comme le montre Lutter (2000), ce qui pourrait les conduire à préférer des objectifs non contraignants. On notera cependant que des objectifs non contraignants dynamiques pourraient donner plus de chance à une participation effective des pays en développement aux échanges de permis d'émissions en suivant au plus près leurs fluctuations économiques.

Certains critiques (Moor et al., 2002) ont toutefois estimé que l'incertitude sur les objectifs quantifiés dynamiques pourraient rendre les échanges de permis difficiles. Cependant, si le lien entre la croissance et les émissions est vérifié, ce ne sera pas le cas. Au contraire, les incertitudes sur ces deux éléments se compenseront. L'incertitude sur le déficit ou le surplus de permis en fin de période sera réduite, et non augmentée, par des objectifs dynamiques en comparaison avec des objectifs fixes. En revanche, il est certain que les objectifs dynamiques requièrent plus d'informations que les objectifs fixes. La mesure du PIB, en particulier, peut être discutable dans nombre de pays en développement. Un problème de moindre gravité est celui du choix des unités de mesure du PIB. Cependant, si l'on renonce à vouloir comparer les pays entre eux pour s'intéresser avant tout aux évolutions du PIB au sein de chaque pays, l'utilisation de monnaie locale constante peut généralement convenir.

L'utilisation d'objectifs dynamiques par des pays industrialisés suscite des craintes différentes, qui tiennent à l'incertitude sur les niveaux d'émissions de gaz à effet de serre inhérente à cette option (Moor et al., 2002). Müller et al. (2002) soulignent que les niveaux d'émissions ne peuvent pas être garantis. Ils suggèrent que des « objectifs intensité » ne pourraient délivrer des réductions substantielles que si la réduction d'intensité requise est supérieure à la croissance (ce qui est exact) et que de tels objectifs perdraient dès lors leur intérêt par comparaison avec des objectifs fixes du type Kyoto. C'est là passer à côté de l'essentiel, l'existence d'une incertitude sur les coûts de réduction, en partie due à l'incertitude sur les projections de croissance. Naturellement, si la projection de croissance sur laquelle l'objectif est basé se réalise, la quantité assignée ne sera pas ajustée et les coûts réels seront les mêmes que les objectifs soient fixes ou dynamiques. La différence repose dans les coûts attendus avant que l'incertitude soit levée. Tout en fournissant davantage de réductions que des objectifs fixes si la croissance économique est plus faible que prévue, les objectifs dynamiques reviennent moins cher que les objectifs fixes quand les coûts marginaux s'avèrent plus élevés que prévu. Ils permettent en outre l'adoption d'objectifs plus ambitieux pour des espérances de coûts inférieurs – au

bénéfice de l'environnement. Mais bien entendu, cette possibilité ne signifie pas que le choix d'objectifs dynamiques sera nécessairement associé avec un niveau d'ambition plus important. La négociation de futurs objectifs fixes ne fournit d'ailleurs pas davantage de garanties – probablement plutôt moins.

Conclusion

L'impossibilité de fixer un niveau optimal de concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère combinée à la nécessité d'agir cependant sans délai conduit à préconiser l'adoption d'objectifs à long terme ambitieux mais sous conditions de coûts. Les options d'objectifs de court terme indexés sur la croissance économique, d'un côté, ou de prix plafond (pour les pays industriels) et d'objectifs non contraignants (pour les pays en développement) permettent de mettre concrètement en œuvre cette recommandation. Autorisant une différenciation large des divers paramètres en fonction des circonstances des divers pays, ces options peuvent permettre de créer un cadre global d'action étendu à tous les pays. Les échanges de permis, innovation fondamentale de Kyoto, sont conservés pour concilier l'équité et l'efficacité économique – deux conditions essentielles du succès à long terme.

Références bibliographiques

- Aldy J.E., P.R. Orszag et J.E. Stiglitz (2001) : *Climate Change: An Agenda for Global Collective Action*, Présenté à la Conférence 'The Timing of Climate Change Policies', Pew Center on Global Climate Change, octobre.
- Baumert K.A., R. Bhandari et N. Kete (1999) : « What Might a Developing Country Climate Commitment Look Like? », *Climate Notes*, World Resources Institute, Washington DC.
- Baumol W.J. et W.E. Oates (1988) : *The Theory of Environmental Policy*, 2^e édition, Cambridge University Press, MA.
- Bolin B. (1998) : « The Kyoto Negotiations on Climate Change: A Science Perspective », *Science*, vol. 279, 16 janvier, pp. 330-331.
- Cournède B. et S. Gastaldo (2002) : *Combinaison des instruments prix et quantités dans le cas de l'effet de serre*, Mimeo, Paris.
- Frankel J.A. (1999) : « Greenhouse Gas Emissions », *Policy Brief*, 52, Brooking Institution, juin.
- IEA (Agence internationale de l'énergie) (2002) : *Beyond Kyoto: Energy Dynamics and Climate Stabilisation*, Paris, OCDE.
- IPCC (Groupe interministériel d'études sur le changement climatique) (2001) : *Climate*

- Change 2000*, vol. I: *Science* ; vol. 2: *Impacts* ; vol. 3: *Mitigation*; Synthesis Report, Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge (RU) et New York.
- Jacoby H.D. et A.D. Ellerman (2002) : *The 'Safety Valve' and Climate Policy*, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, MIT, Cambridge, MA, février.
- Lisowski M. (2002) : « The Emperor's New Clothes: Redressing the Kyoto Protocol », *Climate Policy*, vol. 2, n° 2-3, septembre.
- Lutter R. (2000) : « Developing Countries' Greenhouse Emissions: Uncertainty and Implications for Participation in the Kyoto Protocol », *The Energy Journal*, vol. 21, n° 4.
- Moor, de, A.P.G., M.M. Berk, M.G.J. den Elzen et D.P. van Vuuren (2002) : « Evaluating the Bush Climate Change Initiative », *Rapport RIVM*, 728001019/2002, Bilthoven, NL.
- Morgenstern R.D. (2002) : « Reducing Carbon Emissions and Limiting Costs », *Resources for the Future*, février.
Disponible sur <http://www.rff.org/climatechangemorgenstern.pdf>
- Müller B., A. Michaelowa et C. Vrolijk (2002) : « Rejecting Kyoto. A Study of Proposed Alternatives to the Kyoto Protocol », *Climate Strategies*.
Disponible sur <http://www.climate-strategies.org>
- Neumayer E. (2001) : *Weak versus Strong Sustainability*, Edward Elgar, Cheltenham (RU) et Northampton, MA.
- Newell R.G. et W.A. Pizer, (2000) : « Regulating Stock Externalities Under Uncertainty », *Resources for the Future Discussion Paper*, 99-10, Washington DC, février.
- OCDE/AIE (2001) : *The Commitment Period Reserve*, Information Paper, OCDE, Paris.
- Philibert C. (1999) : « The Economics of Climate Change and the Theory of Discounting », *Energy Policy*, vol. 27, n° 15, décembre.
- Philibert C. (2000) : « How Could Emissions Trading Benefit Developing Countries », *Energy Policy*, vol. 28, n° 13, novembre.
- Philibert C. et J. Pershing (2001) : « Des objectifs climatiques pour tous les pays : les options », *Revue de l'Énergie*, n° 524, février.
- Roberts M.J. et M. Spence (1976) : « Uncertainty and the Choice of Pollution Control Instruments », *Journal of Public Economics*, vol.5, avril/mai.
- Weitzman M.L. (1974) : « Prices vs. Quantities », *Review of Economic Studies*, vol. 41, octobre.

Complément F

Marchés de droits, expériences et perspectives pour l'effet de serre^(*)

Christine Cros

*Secrétariat général du comité interministériel
pour les questions de coopération européennes (SGCI)*

Sylviane Gastaldo

*Ministère de l'Écologie et du Développement durable, Direction
des études économiques et de l'évaluation environnementale (D4E)*

Un droit à polluer ou un permis d'émission représente l'autorisation de rejeter une quantité de pollution pendant une période donnée. Du point de vue économique, il apparaît comme la création indirecte d'un nouveau service représentatif de l'effet externe visé : la pollution. Les pollueurs reçoivent, gratuitement ou non, une quantité initiale de droits de polluer. Si leurs déversements réels sont inférieurs à leurs droits, ils peuvent céder ces permis à d'autres pollueurs désireux d'émettre davantage. L'organisation d'un marché concurrentiel sur lequel les offres et demandes de permis se confrontent fait apparaître un prix d'équilibre pour ces permis, et rétablit l'optimalité des décisions décentralisées des pollueurs en matière de dépollution, au sens où l'objectif de qualité d'environnement est atteint au coût total le plus faible, puisque ce sont ceux dont les coûts de dépollution sont les moins élevés qui réduisent leurs déversements. Ce nouveau service doit tout d'abord faire l'objet d'une allocation initiale (marché primaire), puis il fait l'objet de transactions entre agents (marché secondaire).

L'instrument est basé sur la distinction des deux éléments suivants :

- les émissions réelles, qui doivent être précisément mesurées. Les mécanismes d'échanges de droits d'émission ou de certificats de réduction d'émission ne sont utiles que si l'on cherche à obtenir une performance environnementale quantitative, et que le phénomène environnemental visé

(*) Les auteurs tiennent à remercier Richard Baron, Emmanuel Martinez et Cédric Philibert de leur relecture attentive et de leurs précieux commentaires.

présente une neutralité spatiale et temporelle : la puissance publique en charge de l'environnement est alors indifférente à la répartition des émissions ;

- les droits d'émettre, qui doivent pouvoir s'échanger le plus librement possible (sans autorisation administrative préalable, en particulier), puisque ce sont ces mouvements qui permettent de passer de l'allocation initiale à l'allocation finale (à enjeu d'efficacité économique). L'allocation est nécessairement un moment politique critique à cause des enjeux redistributifs, mais cela n'est pas spécifique à un système de permis : tout autre instrument, réglementaire ou fiscal, doit nécessairement affronter la même épreuve.

La dualité du système de permis négociables implique la mise en place d'un double système de sanctions :

- en cas de fausse déclaration des émissions réelles, il suffit qu'elles soient dissuasives. Il est à noter que ce type de dispositions n'est pas spécifique à un marché de droits, mais une nécessité pour toute politique environnementale qui se veut crédible, qu'elle soit réglementaire ou fiscale ;

- en cas de défaut de permis par rapport au montant d'émissions réelles, en fin de période. Dans ce cas, une disposition telle qu'une pénalité financière automatique par permis manquant est suffisante. Cette clause impose une borne supérieure aux coûts marginaux de réduction des émissions. L'obligation éventuelle de compenser les permis manquants lors de la période suivante permet en outre de restaurer l'environnement.

Après avoir retracé un historique rapide de l'émergence des échanges de permis de pollution atmosphérique, qui est essentiellement américaine, la seconde partie traite plus spécifiquement de l'effet de serre et du recours prévisible à différents types de marché pour lutter contre le changement climatique.

1. Les premiers marchés de droits : d'assouplissements de la réglementation à une rationalisation économique

1.1. Expériences dans le domaine de la pollution atmosphérique

1.1.1. Les expériences de crédits aux États-Unis dans les années soixante-dix

Depuis le milieu des années soixante-dix, l'*Emission Trading Program* permet des échanges de crédits aux États-Unis. Plus que comme l'instauration d'un véritable marché, il doit être analysé comme un assouplissement de la réglementation laissant les industriels proposer des arrangements différents de la répartition des émissions tant que l'effet sur l'environnement est neutre ou favorable. Ces expériences connaissent des déclinaisons très différentes selon les États, mais sont très strictement encadrées, et ne peuvent se faire qu'à un niveau local :

- pour les sources de pollution déjà existantes, un système de bulles (*bubble policy*) a été introduit en 1975. Les industriels peuvent répartir les

émissions des sources existantes à l'intérieur d'une bulle indifféremment des spécifications réglementaires de chaque équipement, tant que les émissions totales restent au même niveau ;

- le système de compensation (*offset policy*) introduit en 1977, permet à de nouvelles sources de pollution de s'installer dans des zones dépassant les seuils de qualité de l'air ambiant si elles acquièrent auprès des sources implantées dans la même zone le montant de droits d'émettre nécessaire pour couvrir leurs émissions et adoptent la technologie la moins polluante ;

- dès 1979, les crédits de réduction des émissions peuvent aussi être mis en réserve (*banking*) pour une utilisation ou une vente ultérieures ;

- depuis 1981, les sources de pollution modifiées doivent satisfaire les normes technologiques les plus strictes sauf si les émissions nettes totales de l'installation sont égales au niveau antérieur à la modification (*netting policy*).

Le cadre des échanges ainsi délimité est proposé par l'Environment Protection Agency (EPA) (à l'exception des *offsets* qui sont obligatoires), et chaque État doit respecter les normes de qualité de l'air, mais est libre d'adopter ou non ces méthodes. C'est ainsi que certains États n'ont pas mis en place de marchés de droits à polluer, alors que d'autres les ont instaurés, en renforçant même parfois les règles. Cette diversité complique l'analyse et le suivi des transactions réalisées.

1. Bilan des échanges de droits à polluer l'air, en 1985

	Autorité de décision	Nombre de transactions	Baisse des coûts de dépollution (millions de \$)	Impact sur la qualité de l'air
Bulles	État fédéral	42	300	Neutre
	État	90	135	Neutre
Émissions nettes	État	5 000 à 12 000	525 à 12 000	Faiblement négatif
Compensation	État	2 000	Pas approprié	Neutre
Mise en réserve	État	100	Très faible	Faiblement positif

Source : Hahn et Hester, 1989.

La faiblesse relative de l'utilisation de ces mécanismes (tableau 1) a plusieurs origines : un manque de clarté réglementaire, une absence véritable de marché et l'inertie des politiques. Ces mécanismes sont restés éloignés des caractéristiques de véritables échanges marchands. Les procédures d'autorisation étaient longues et coûteuses, la mesure des émissions était incertaine ; de plus, la multiplication des étapes au sein de la procédure administrative a entraîné un manque de confiance des agents dans la pérennité de mécanismes dont les possibilités de dénonciations étaient importantes. L'information était imparfaite : non seulement les coûts de recherche du partenaire étaient élevés, mais en outre, aucun prix de marché n'était révélé. Le prix d'un échange dépendait largement du pouvoir de négociation des partenaires. Chaque transaction impliquait d'importants

coûts administratifs, ainsi que des coûts d'évaluation des émissions. Cette incertitude de la correspondance entre réductions d'émissions et crédits a pénalisé le programme.

1.1.2. La suppression du plomb dans l'essence aux États-Unis

En 1982, l'EPA a imposé une limitation plus stricte sur la teneur en plomb dans l'essence et autorisé les échanges de droits à utiliser du plomb, en particulier pour aider les petits raffineurs dont on prévoyait qu'ils éprouveraient des difficultés à respecter les nouvelles normes. Un raffineur pouvait ainsi produire de l'essence contenant plus de plomb que la limite, sous réserve d'acheter les droits correspondants aux raffineries qui produisaient de l'essence contenant moins de plomb que la norme. Les permis, d'une durée d'un trimestre, étaient attribués aux producteurs et raffineurs de toutes tailles, et leur étaient alloués en fonction de leur production courante multipliée par la concentration de plomb tolérée. Les échanges internes ou entre entreprises étaient libres sur la base de un pour un.

En 1985, l'EPA a fortement réduit le montant global des permis en diminuant la concentration de plomb tolérée, autorisé la mise en réserve et annoncé la fin du programme pour 1986, avec prolongation jusqu'en 1987 pour ceux qui avaient mis en réserve des droits. Une étude préalable de l'EPA chiffrait à 226 millions de dollars les gains des raffineurs, sur la base d'une estimation du volume de mise en réserve de 9,1 milliards de grammes de plomb. Avant 1985, on observait comme prévu de forts achats de droits par une partie des petits raffineurs auprès des gros, ce qui leur permettait de rester au-dessus des normes de l'EPA. En 1985, un tiers environ des petits raffineurs ainsi que les gros ont réduit significativement leurs ajouts de plomb, et ont ainsi mis en réserve des droits qu'ils ont utilisés en 1986 et 1987 pour dépasser les normes particulièrement sévères de l'EPA.

Au total, le marché a été très actif : selon les trimestres, de 7 à 50 % de l'ensemble des droits ont fait l'objet d'échanges. Les économies réalisées se chiffrent en centaines de millions de dollars, sans remise en cause des normes de pollution. Le succès de ce programme tient au peu de restrictions imposées aux échanges, à la simplicité et la clarté de la définition et de la distribution des droits, à l'habitude des raffineurs à négocier entre eux, et à l'engagement précis et crédible sur le futur.

Tirant les leçons de ces premières expériences, les amendements de 1990 à la Loi sur l'air (*Clean Air Act*) ont confirmé l'intérêt du législateur américain pour cet instrument. Cette loi a en particulier organisé un véritable marché des émissions de SO₂ des centrales électriques.

1.2. Une référence : le marché du SO₂ aux États-Unis

Les amendements à la Loi sur l'air de 1990 prévoyaient la création d'un véritable marché fédéral de droits à émettre du dioxyde de soufre (SO₂) pour réduire ces émissions de moitié d'ici l'an 2000, et lutter ainsi contre le phénomène des pluies acides. La politique a été organisée sur un mode

séquentiel : deux phases ont été distinguées, l'une prenant effet en 1995, et l'autre en 2000. Les participants ne sont pas les mêmes durant chacune de ces deux phases. Lors de la première, seules les centrales thermiques d'une capacité supérieure à 100 mégawatts (MW) fonctionnant au charbon, et ayant un taux d'émission supérieur ou égal à 2,5 livres par million d'unités thermiques britanniques (lb/mmBtu) sont concernées. À partir de l'an 2000, toutes les centrales thermiques d'une capacité supérieure à 25 MW et ayant un taux d'émission supérieur ou égal à 1,2 lb/mmBtu sont impliquées dans le programme de réduction. Tout participant doit s'équiper d'un système de mesure en continu des émissions.

L'allocation des droits est fondée sur un principe hybride combinant à la fois une base historique de référence et un niveau technique moyen. Le programme devient plus sévère au cours du temps. Les règles d'attribution de base ont été calculées à partir du seuil objectif, de la moyenne de la production électrique des années de 1985 à 1987, et des technologies connues. Afin de venir à bout de la résistance de certains acteurs, et en particulier des régions fortement liées au charbon, des aides ont été accordées sous forme de permis supplémentaires et de fonds d'aide à la reconversion des travailleurs. 2,8 % du quota général des permis a été réservé pour une vente annuelle aux enchères^(*). Cette procédure a pour objectif principal d'assurer un minimum de liquidité au marché, et pour corollaire heureux d'afficher un prix de marché.

Aux États-Unis, un permis est défini, non comme un droit de polluer, mais comme une autorisation d'émettre, pendant une année spécifiée, une tonne de SO₂ allouée à un agent particulier. Les permis sont réalloués à l'identique de période en période sur la durée du programme. La propriété étant un droit absolu et fondamental, le régulateur a voulu limiter le degré d'irréversibilité institutionnelle de sa politique. L'EPA ne peut pas modifier l'allocation des permis, mais le Congrès peut réviser sa politique. Il devrait alors invoquer l'intérêt général et justifier précisément sa décision de modification de la situation. De plus, la politique ayant été construite comme un tout, avec des phases établies dans le temps, l'horizon temporel de stabilité est suffisamment conséquent pour que les industriels s'engagent sur le marché. Les participants ont le droit de mettre en réserve des permis et de les utiliser lors d'une période ultérieure.

Le rôle de l'EPA se borne au contrôle des équipements de mesure des émissions, l'enregistrement des transactions et, en fin d'année, la vérification que les permis détenus sont suffisants pour couvrir les émissions. Elle enregistre également des économies de permis pour les mettre en réserve. Des pénalités dissuasives – en 1995, 2 000 dollars par tonne de SO₂, soit au moins le triple du coût marginal estimé de réduction des émissions – sont prévues pour les sources qui ne seraient pas en possession d'un montant suffisant de droits. Jusqu'à maintenant, elles n'ont jamais eu besoin d'être appliquées car le prix du permis est de l'ordre de 150 dollars.

(*) Cf. Gastaldo (2001) pour une description de cette mise aux enchères et de ses résultats.

Les évaluations de ce marché sont satisfaisantes du point de vue de l'environnement, du coût supporté par les centrales électriques, de l'émergence du signal-prix, ce qui fait de ce marché un exemple de référence. D'autres mécanismes d'échange de permis ou de crédits existent aux États-Unis en matière de pollution atmosphérique.

1.3. Quelques leçons des expériences passées

La mise en place d'un marché de droits suppose au préalable la définition des éléments suivants :

- identification des agents visés, c'est-à-dire initialement titulaires de droits ;
- définition du seuil global et allocation des droits par attribution gratuite ou payante de droits primaires, qui conditionne fortement les conséquences redistributives. Les effets d'annonce en cas d'attribution peuvent s'avérer importants et mener à des comportements stratégiques. Le traitement des fermetures d'installations ou des nouveaux entrants doit également être précisé :
- définition juridique et physique du permis (nature et portée du droit, autorité régulatrice, durée, unité) ;
- mise en place d'un système de mesure des émissions fiable ;
- identification des agents habilités à intervenir sur le marché. Éventuellement, des courtiers peuvent être autorisés pour diminuer les coûts de transaction ; les associations de protection de l'environnement peuvent le cas échéant se porter acquéreurs de permis, et donc forcer à une réduction plus importante de la pollution ;
- mise en place d'un système de suivi des échanges ;
- définition d'un système de sanction crédible.

2. Les marchés de l'effet de serre

Les négociations internationales sur le climat ont conduit les pays développés à prendre des engagements sur leurs émissions de gaz à effet de serre en 2008-2012, engagements assortis de mécanismes de flexibilité qui permettent une meilleure répartition des efforts correspondants. Avant même 2008, des pays et des entreprises multinationales ont déjà mis en place des marchés de permis d'émissions de gaz à effet de serre, et l'Union européenne propose de mettre en place un système d'échanges de quotas pour ses industries intensives en énergie et le secteur de la production d'électricité dès 2005. Ainsi donc, plus qu'une inauguration solennelle d'un marché international en 2008, il faut plutôt s'attendre à des accords de reconnaissance mutuelle et des connexions entre les marchés.

2.1. Les négociations internationales sur le climat ont créé des actifs échangeables

Le Protocole de Kyoto (1997) est la première initiative d'instauration d'un système de permis négociables à l'échelle internationale : les pays industrialisés ont accepté des limites à leurs émissions de gaz à effet de serre, mais assorties de mécanismes de flexibilité. La mutualisation des engagements par la constitution d'une bulle est autorisée mais ne donne pas vraiment lieu à des échanges : il s'agit d'une déclaration *a priori* de la modification des quotas initiaux sans contrepartie financière. Il y a ensuite trois mécanismes, l'un basé sur des échanges de quotas, et les deux autres sur des échanges de crédits provenant de la certification de réductions d'émissions relatives à des projets dans les pays en transition ou dans les pays en voie de développement. Quatre unités différentes seront librement échangeables sur le marché (tableau 2) : les permis, les crédits issus de la mise en œuvre conjointe et du mécanisme de développement propre et les crédits provenant de la captation du carbone par les puits. Des restrictions symboliques ont été fixées à la possibilité de mise en réserve des trois derniers types d'unités.

Un marché de permis négociables n'est un instrument efficace que si on est en mesure, en fin de période, de comparer, pour chaque participant, l'adéquation de ses émissions et du total des permis et crédits qu'il détient. C'est pourquoi, avant de participer au marché, ou d'utiliser les crédits d'un projet, un pays doit prouver qu'il est en mesure de fournir des inventaires d'émissions conformes aux règles reconnues par le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qu'il a établi son quota initial de permis, et qu'il détient un registre propre à enregistrer les transactions : ce sont les critères d'éligibilité au marché.

Le système dit d'« observance » a prévu des sanctions en cas de non-conformité aux engagements quantitatifs en fin de période : l'obligation de restaurer les permis manquants lors de la période suivante avec un taux de pénalité de 1,3 ainsi que l'obligation de proposer un plan national de politiques et mesures. Le pays se voit également suspendre le droit de vendre lors de la période suivante.

2.2. Les mécanismes de projets

Des institutions ont été créées pour superviser les deux mécanismes par projets afin d'assurer que les crédits qui seront émis correspondent à de véritables réductions d'émissions. Le Protocole a prévu qu'un Conseil exécutif supervise l'ensemble du processus de mécanisme de développement propre (MDP) et soit responsable du travail des entités opérationnelles – consultants qui seront accrédités – chargées de valider et vérifier les projets. Le Conseil exécutif validera les méthodologies utilisées et émettra les crédits certifiés. Le premier Conseil exécutif a été élu à Marrakech, en novembre 2001, pour assurer un démarrage rapide des projets MDP.

2. Les actifs créés par la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (UNFCCC)

Actif créé	Responsabilité institutionnelle	Acteurs impliqués	Périodes de validité
Article 6 : Mise en œuvre conjointe (MOC)			
Unité de réduction d'émission <i>ERU (Emission Reduction Unit)</i>	Émission d'un ERU par conversion d'un AAU du pays hôte	Parties de l'Annexe I et autres personnes juridiques (entreprises) Vérification par une entité indépendante dans la 2 ^e voie	Émission et échange d'ERU à partir de 2008 pour des réductions 2008-2012 Thésaurisable dans la limite de 2,5 % de l'allocation initiale de la Partie
Article 12 : Mécanisme de développement propre (MDP)			
Réduction d'émission certifiée <i>CER (Certified Emission Reduction)</i>	Émission d'un CER par le Conseil exécutif après vérification/certification	Parties de l'annexe I, autres personnes juridiques (entreprises) et Parties hors de l'annexe I Validation et vérification par les entités opérationnelles	Émission et échange de CER à partir de 2002 pour des réductions 2000-2012 Thésaurisable dans la limite de 2,5 % de l'allocation initiale de la partie
Article 17 : Commerce international			
Unité de montant alloué <i>AAU (Assigned Amount Unit)</i>	Émission d'AAU par le pays après agrément par l'équipe de revue d'expert de son inventaire 1990	Parties de l'Annexe B Autres personnes juridiques (entreprises) autorisées	Émission et échange d'AAU à partir de 2008 Thésaurisable sans limite
Unité de suppression <i>RMU (Removal Unit)</i>	Émission de RMU par le pays après agrément par l'équipe de revue d'expert de son inventaire	Parties de l'Annexe B Autres personnes juridiques (entreprises) autorisées	Émission et échange de RMU à partir de 2009 Aucune thésaurisation

Source : Auteurs, inspirées par Godard et Henry (1998) et réactualisé pour tenir compte des Accords de Marrakech (2001).

2.3. La Directive européenne en discussion prévoit des échanges de quotas en 2005

La Commission européenne a présenté en octobre 2001, un projet de directive faisant suite au Livre vert publié en mars 2000 pour l'établissement d'un système d'échange de quotas d'émissions de gaz à effet de serre (GES). L'objectif de cette proposition de Directive est double : d'une part, réduire les émissions de GES des pays de l'Union européenne et, d'autre

part, déclencher un phénomène d'apprentissage d'un système de permis de GES auprès des industriels européens afin qu'ils soient prêts, en 2008, à évoluer sur le marché international.

Elle propose, dès 2005, un système obligatoire qui couvrirait 46 % des émissions communautaires de CO₂ en incluant les secteurs de la production d'énergie, production et transformation des métaux non ferreux, industrie minérale, et fabrication de pâte à papier et papier et carton, soit 4 000 à 5 000 installations. La Directive ne se prononce pas sur l'allocation des droits : elle laisse aux États membres le soin d'établir des plans d'allocation, sous réserve qu'elle soit gratuite pour la première période (2005-2007). Ces plans seront évalués à l'aune de critères de respect de la concurrence et des règles d'attribution des aides d'État pour la protection de l'environnement, mais il n'y a pas de règle d'allocation qui s'impose aux pays. Les modes d'allocation seront homogénéisés pour la seconde phase, à partir de 2008, lors de l'entrée en vigueur du Protocole.

La nature du quota n'est pas stabilisée :

- il devrait recouvrir les seules émissions de CO₂ pour la première phase 2005-2007 et être étendu aux autres gaz à partir de 2008. L'intégration des différents gaz dépendra de la crédibilité et de la précision des protocoles de mesure pour chacun des gaz ;
- le projet de directive ne précise pas le statut juridique du quota ;
- une ambiguïté subsiste quant au fait que les quotas européens seront ou non des AAU du Protocole de Kyoto dès 2008. En effet, si un des objectifs du marché de permis est de constituer un processus d'apprentissage afin que les entreprises européennes puissent intervenir sur la scène internationale, il est nécessaire qu'en 2008 elles détiennent la « monnaie » du jeu, des unités de montant alloué (*Assigned Amount Unit – AAU*). Or il n'est pas question dans le projet de directive de rétrocession des AAU des États membres à leurs entreprises. Le lien est reconnu par la demande d'ajustement de la répartition des quotas au sein de la bulle européenne, en fonction des échanges. Par ailleurs, les réductions d'émission certifiées (*Certified Emission Reduction – CER*) (crédits issus du mécanisme de développement propre) pourraient être reconnus dans ce système dès 2005 ; une directive dite projets est en cours d'élaboration à ce sujet ;
- la durée de validité des permis n'est pas fixée et pourrait être hétérogène. La possibilité d'autoriser ou interdire une thésaurisation de permis lors du passage en 2008 (pré-Kyoto et Kyoto) est laissée à l'appréciation des pays. La mise en réserve serait en revanche obligatoire dans les périodes ultérieures et sans taux de dépréciation.

La Commission propose un système de sanctions élaboré. Une entreprise dont le rapport d'émissions serait erroné se verrait suspendre le droit de vendre des permis. Une entreprise qui ne posséderait pas au moins autant de quotas que ses émissions réelles se verrait imposer une pénalité par tonne d'émission excédentaire correspondant au plus élevé des deux tarifs :

50 euros (100 euros pour la 2^e période), ou le double du prix moyen de marché. Par ailleurs cette pénalité n'est pas libératoire car l'entreprise devra aussi restituer les tonnes manquantes l'année suivante.

3. Caractéristiques des marchés nationaux danois et anglais

Danemark	Royaume-Uni
<p>Permis</p> <ul style="list-style-type: none"> • Annuel, d'une tonne d'émissions directes de CO₂. <p>Participants</p> <ul style="list-style-type: none"> • Centrales électriques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Annuel, d'une tonne-équivalent-CO₂ d'émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre.
<p>Règles d'échange</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sur la base de un pour un, et sans limitation. • Désir d'ouvrir le marché dès que possible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Première catégorie : entreprises volontaires après examen de leur dossier de candidature et une participation aux enchères répartissant une incitation financière à la réduction d'émissions. • Deuxième catégorie : entreprises ayant souscrit un engagement volontaire et se faisant établir des crédits pour la différence entre leurs engagements et la réalité. • Autres participants : opérateurs volontaires.
<p>Observance</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tout défaut de permis d'une entreprise est sanctionné par une pénalité financière de 40 couronnes danoises par tonne de CO₂. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tout défaut de permis d'une entreprise volontaire est sanctionné par le remboursement des aides financières accordées et par la suspension ou l'interdiction de l'accès au marché. De plus, il y aura une retenue du même volume d'émissions l'année suivante. D'autres formes de pénalités financières sont examinées. • Tout défaut de permis d'une entreprise ayant souscrit un engagement volontaire remet en cause la réduction du taux de taxe sur le carbone pour les deux années suivantes.

Source : Auteurs.

2.4. Des marchés nationaux existent déjà au Danemark et au Royaume-Uni

Le Danemark et le Royaume-Uni sont les premiers pays européens à avoir mis en place un marché national de permis pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Le système danois a commencé depuis 2000, alors que le démarrage du système anglais a finalement eu lieu en avril 2002.

Ces marchés nationaux ne restent effectivement pas isolés. Dès le début de l'année 2002, des échanges étaient rendus publics (mais pas leur prix). 160 000 tonnes de CO₂ danois ont ainsi été achetées en trois échanges par des entreprises allemandes et anglaises, dont 100 000 tonnes par E.ON et 10 000 par Entergy. DuPont, la compagnie chimique américaine a vendu 10 000 permis anglais de l'année 2002 à Mico, une filiale d'une compagnie de commerce japonaise.

2.5. Les échanges internationaux existent déjà

Plutôt que de mettre en exergue quelques transactions qui ont été rendues publiques, il paraît plus utile de rassembler l'information synthétique rassemblée et publiée par les courtiers. Alors même que le cadre des futurs échanges et des actifs n'est pas encore clairement défini, des transactions ont lieu, de la part d'acteurs qui veulent acquérir une expérience ou montrer les avantages des échanges relativement à d'autres mécanismes de régulation. Toutes ces transactions sont un signe tangible de la confiance dans le fait que les émissions de gaz à effet de serre feront réellement l'objet d'une maîtrise dans un avenir proche.

Les actifs (permis et crédits) n'étant pas encore créés, sauf dans le cas danois, ils ne peuvent à proprement parler faire l'objet d'échanges. Ce que l'on qualifie donc de transactions sont en fait des contrats conclus entre deux parties et qui ne peuvent porter sur un sous-jacent commun. La plupart des échanges sont relatifs à des réductions d'émissions certifiées, donc vérifiables par une tierce partie, et qui pourraient potentiellement faire l'objet d'une reconnaissance par les futurs gouvernements. C'est ainsi que Natsource, un courtier actif sur le changement climatique, estimait en août 2001 à 55 millions de tonnes équivalent CO₂ (MteqCO₂) le volume des échanges contracté lors d'une centaine d'échanges inter-entreprises. Dans le meilleur des cas, ces échanges seront l'équivalent de transactions à terme, c'est-à-dire qu'ils trouveront leur valeur juridique sur le marché international en 2008-2012. Cette valorisation n'étant pas certaine, ces échanges représentent une véritable prise de risque des opérateurs.

En matière de recours aux mécanismes par projets, deux acteurs majeurs sont d'ores et déjà très actifs : le gouvernement néerlandais qui se porte directement acquéreur de crédits, et le Fonds prototype carbone. Le programme ERUPT (*Emission Reduction Unit Procurement Tender*) est

un appel d'offre du gouvernement néerlandais qui propose de financer des entreprises proposant des projets susceptibles de délivrer des crédits selon le mécanisme de « mise en œuvre conjointe ». Lors du premier appel d'offre, des projets ont été financés en République tchèque (biomasse), en Roumanie et en Pologne, et les premières transactions ont surpris par leur prix relativement élevé (8 dollars par tonne de CO₂) avant que les observateurs ne réalisent qu'elles n'avaient aucune valeur légale certaine dans le Protocole (aucun gouvernement n'étant contrepartie). Récemment, les Pays-Bas ont fait encore d'autres transactions et lancé des appels d'offre pour des crédits MDP. En décembre dernier, le ministère de l'Environnement néerlandais a souscrit un accord-cadre avec le Panama portant sur 20 millions de tonnes de CO₂ sous forme de crédits MDP relatifs à des projets énergétiques.

4. Échanges d'actifs relatifs à des gaz à effet de serre

	Millésime	Fourchette de prix en \$/téqCO ₂
Réductions d'émissions certifiées dans un pays de l'annexe B	1991-2007	0,6 à 1,5
	2008-2012	1,65 à 3
Réductions d'émissions certifiées dans un pays hors annexe B	2000-2001	1,75 à 3
Réductions d'émissions	1996-2012	1 à 2,7
ERU du gouvernement néerlandais	2008-2012	4,4 à 7,99
Permis du gouvernement danois	2001-2003	3,55 à 4,14
Permis anglais	2002	6,5 à 9,15

Sources : Natsource, 21 août 2001, selon Varilek et Marenzi (2001).

Le même gouvernement néerlandais a signé en janvier 2002 un contrat de 40 millions de dollars avec la Banque mondiale pour co-financer des projets d'énergie « propre » dans les pays en développement, et recevoir en échange des crédits MDP pour 10 millions de tonnes de CO₂ de réduction. Ces accords cadres avec des pays hôtes sont financés par le fonds du programme ERUPT. Ce dernier, destiné à acquérir des crédits provenant de MDP, a clôturé fin janvier 2002 sa procédure initiale d'identification des projets. Les prix proposés vont de 3 à 5 euros/teqCO₂.

Le Fonds prototype carbone, proche de la Banque mondiale, a pour cotisants des gouvernements et des entreprises privées (dont Gaz de France), qui investissent dans des projets susceptibles de délivrer des crédits de projets MOC ou MDP. Gaz de France souligne l'intérêt d'y participer pour apprendre et comprendre (voire façonner ?) sur des exemples réels la façon dont les calculs de réduction d'émission pourront être élaborés.

Aux États-Unis, plusieurs initiatives privées voient aussi le jour, dont le projet pilote est le Chicago Climate Exchange (CCX) qui propose un système volontaire de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et affiche une ambition de réduction de 5 % des émissions des sociétés partici-

pantes par rapport à leur niveau d'émission de 1999. Le système fonctionnera au départ sur une base régionale de sept États du Midwest (Illinois, Indiana, Iowa, Michigan, Minnesota, Ohio et Wisconsin) pour s'étendre en 2003 au reste du pays, au Canada et au Mexique puis en 2004 à l'international. CCX regroupe déjà une quarantaine de participants issus de secteurs variés (BP, DuPont, Exelon, Ford, Waste Management, etc.). Ces transactions sont encore plus risquées pour les opérateurs, au vu du refus du gouvernement américain de ratifier le Protocole de Kyoto.

De nombreuses expériences de simulation sont également proposées, par exemple le système GETS (Greenhouse and Energy Trading Simulation) développé par Euronext et PriceWaterhouse Coopers sous la supervision du syndicat européen des électriciens Eurelectric, ou la simulation orchestrée par l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Conclusion

L'effet de serre est un problème d'environnement global, qui présente donc une flexibilité spatiale totale. En revanche, le phénomène est cumulatif ce qui signifie que la flexibilité temporelle n'est pas absolue : il vaut mieux réduire tôt. En termes de système de permis, cela signifie qu'il est intéressant d'autoriser la thésaurisation des droits mais pas l'emprunt sur le futur.

Un système international de permis négociables a été mis en place par le Protocole de Kyoto. Les entités responsables des engagements et donc des échanges sont les États. Une transaction privée ne peut se faire que sous la responsabilité et l'accord (automatique ou non) des États. Pour remplir leurs engagements, les États ont à leur disposition une palette de politiques et mesures, dont les systèmes de permis négociables. Il n'y a pas d'automatisme entre la participation à Kyoto et l'adoption d'un système national de permis négociables. Un pays qui fait le choix d'utiliser cet instrument sur la scène intérieure doit cependant penser à l'articulation de son système avec le système international dans lequel il est impliqué de fait. Différentes questions se présentent à lui.

Si le régulateur envisage de connecter l'ensemble de son économie sur le marché international, il faut adopter un système dit amont où les quotas pèsent sur les intrants qui vont susciter des émissions et pas forcément les émissions elles-mêmes. À noter que cela est facilement envisageable pour les émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie, mais pas pour les autres gaz à effet de serre. Cette solution a des mérites économiques indéniables mais présente l'inconvénient politique de répercuter la contrainte sur tous les consommateurs sous forme de taxe.

Si le régulateur envisage de réserver le marché de permis à certains secteurs, les limites restent à établir. L'industrie (particulièrement les gros émetteurs que sont les industries intensives en énergie et les producteurs d'électricité) est le secteur le plus naturel, mais d'autres secteurs peuvent également être régulés par des systèmes de permis négociables : des gestionnaires d'immeubles pour réduire les consommations d'énergie dans les

bâtiments, des décharges pour réduire les émissions de méthane (CH_4), voire sur les émissions de protoxyde d'azote (N_2O) des gros agriculteurs, ou le bilan GES des collectivités locales pour qu'elles orientent leurs choix d'infrastructures... Plus le marché sera large, plus les coûts seront répartis de manière efficace dans l'économie, et les choix de développement orientés par la nouvelle contrainte effet de serre.

L'identification de l'industrie comme opérateur privilégié d'un système d'échange tient à la concentration des opérateurs relativement aux émissions, et encore cela ne vaut-il que pour la grosse industrie. De plus, c'est le secteur qui est véritablement concerné par la concurrence internationale et sur lequel une pression économique supérieure à celle acceptée à Kyoto pourrait avoir des effets compétitifs. Le risque concurrentiel tient aux différences de politiques qui sont inscrites dans le Protocole lui-même entre les pays de l'Annexe B soumis à un objectif quantitatif et les pays hors Annexe B sans contrainte d'émission, mais aussi aux différences des politiques qui seront mises en place entre les pays de l'Annexe B, qu'elles soient de quotas, réglementaire, fiscale, ou de subvention. Par ailleurs nous avons souligné que l'enjeu redistributif d'un système de permis ne tient pas à son fonctionnement, mais à l'allocation initiale des quotas. Les risques concurrentiels pour l'industrie ne sont donc ni introduits ni supprimés par un système de permis négociables.

Un système de permis n'ajoute ou ne retranche pas de problèmes de compétitivité en soi, mais cette question prend toute son acuité sur une zone économique intégrée comme l'Union européenne. Il ne s'agit plus d'articuler deux systèmes mais la coexistence ou superposition de trois systèmes potentiels : international, européen, national. La réconciliation des différences d'approche n'est pas si simple. La première question est de savoir si ce sont les mêmes unités ou actifs qui circulent. Il est rarement envisagé que les contraintes qui pèseraient sur une entreprise française, par exemple, soient absolument indépendantes au niveau français et au niveau européen. Cependant si un État membre instaure des objectifs et donc son système de permis sur l'ensemble des émissions de GES alors que la Directive ne s'intéresse qu'au CO_2 , quelles unités pourront être reconnues et comment ? Une réponse rapide serait de dire que les permis CO_2 seraient identifiés et pourraient seuls servir à rendre compte des obligations au niveau européen. *Quid*, alors, du cas d'une entreprise en conformité avec son objectif national mais pas européen ? Et c'est négliger que les AAUs du Protocole de Kyoto ne sont pas distingués par gaz...

Par ailleurs, des initiatives privées voient le jour dans une anarchie institutionnelle : les systèmes nationaux ne sont pas encore en place ou reconnus, le système international ne fonctionnera officiellement qu'en 2008, les protocoles de certification sont *ad hoc* et reconnaissent souvent plus des réductions d'émission – ce qui soulève le problème des scénarios de référence – que des émissions. Certains opérateurs essaient donc de parier sur le futur en faisant non seulement des transactions valorisables à terme, mais tentent surtout d'influencer les règles d'un jeu pas encore stabilisé.

La mise en place de systèmes de permis négociables distincts, pour répondre à une même politique globale, mais déclinée à des niveaux économiques différents pose une question pratique qui n'a encore jamais été affrontée : celle de l'articulation de systèmes imbriqués. Cela soulève la question de la fongibilité des unités, et donc de la certification, et des reconnaissances croisées de différents systèmes des actifs.

Références bibliographiques

- Commission européenne (2001) : *Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil établissant un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la Directive 96/61/CE*, COM(2001)581 du 23 octobre.
- Cros C. (1998) : *Politique publique d'environnement et efficacité économique. Permis négociables ou instrument réglementaire pour la maîtrise de la pollution atmosphérique : une approche comparative États-Unis/France*, Thèse à l'Université de Paris I sous la direction d'Olivier Godard.
- Cros C. (2001) : « L'expérience américaine des permis négociables pour lutter contre la pollution de l'air », *Revue de l'Énergie*, janvier, n° 523, pp. 22-32.
- Gastaldo S. (1992) : « Les 'droits à polluer' aux États-Unis », *Économie et Statistique*, n° 258-259, octobre-novembre, pp. 35-41.
- Gastaldo S. (2001) : « Les enchères dans l'allocation initiale des permis d'émission négociables » in *Enchères et gestion publique*, Rapport du CAE, n° 34, La Documentation française.
- Godard O. (2001) : *Permis transférables nationaux et politiques environnementales. Conception et application*, OCDE, Paris.
- Godard O. et C. Henry (1998) : « Les instruments des politiques internationales de l'environnement : la prévention du risque climatique et les mécanismes de permis négociables » in *Fiscalité de l'environnement*, Rapport du CAE, n° 8, La Documentation française, pp. 83-174.
- Hahn R.W. et G.L. Hester (1989) : « Where Did all the Markets Go? An analysis of EPA's Emissions Trading Program », *Yale Journal on Regulation*, vol. 6, n° 1, hiver.

Haites E. et F. Mullins (2001) : *Linking Domestic and Industry Greenhouse Gas Emission Trading Systems*, Document préparé pour l'atelier de l'Agence internationale de l'énergie, septembre.

OCDE (1999) : *Implementing Domestic Tradable Permits for Environmental Protection*, Paris, OCDE.

Varilek M. et N. Marenzi (2001) : « Greenhouse Gas Price Scenarios for 2000-2012: Impact of different Policy Regimes », *IWOE Discussion Paper*, n° 96, novembre.

Complément G

Les technologies de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Jean-Louis Bal, François Moisan et Alain Morcheoine

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)

Les émissions de gaz à effet de serre résultant de la production et de l'usage de l'énergie représentent la part la plus importante du bilan mondial des émissions. Le développement des technologies n'émettant pas de gaz à effet de serre ou qui favorisent leur séquestration, ou de celles qui permettent une utilisation plus efficace de l'énergie constitue un enjeu majeur pour réduire les émissions à moyen et long termes. Parmi les options accessibles ou potentiellement disponibles dans les deux décennies à venir, les énergies et matériaux renouvelables peuvent apporter une contribution importante. Les progrès techniques en matière d'utilisation efficace de l'énergie peuvent également contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ce complément se concentre sur les technologies des filières énergies renouvelables et sur les technologies dans le domaine des transports.

1. Les énergies renouvelables

Sont considérées comme énergies renouvelables toutes les énergies issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique et biomasse), l'énergie issue du magma terrestre (géothermie) et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou du gradient thermique des mers sont également issues indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables. Si l'on exclut l'usage traditionnel de la biomasse (bois de feu), en 1997 la contribution des énergies renouvelables au bilan

énergétique mondial représentait environ 190 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) par an. Selon l'Agence internationale de l'énergie cette contribution devrait doubler d'ici 2020 (essentiellement dans les pays de l'OCDE).

Mais l'essentiel de la consommation des énergies renouvelables reste celle de la biomasse dans ses usages traditionnels plus ou moins améliorés dans les pays en développement. Elle représentait 830 Mtep en 1997 et atteindrait 1 000 Mtep en 2020 mais sa contribution relative diminuerait de façon significative (du moins sous la forme la plus traditionnelle de son utilisation comme les foyers ouverts de cuisson) dans toutes les régions du monde excepté en Afrique.

1.1. Les usages thermiques des énergies renouvelables : état de l'art

1.1.1. La biomasse

Il s'agit de la plus ancienne ressource ayant permis à l'homme de développer sa civilisation (énergie, transport, matériaux et, bien entendu, alimentation). Les usages thermiques de la biomasse représentent aujourd'hui en France une contribution au bilan énergétique de 11 Mtep/an dont 8,5 dans le secteur de l'habitat individuel, où 6 millions de foyers français se chauffent partiellement ou totalement au bois. Le bois peut aussi être utilisé dans de grosses chaufferies automatisées alimentant des réseaux de chaleur, des immeubles d'habitat collectifs ou du secteur tertiaire, ou des besoins industriels. Cette utilisation représente en France plus de 1,3 Mtep. Elle croît de 5 % par an. Les principales sources de bioénergies valorisées en France sont, par ordre d'importance :

- chauffage au bois domestique : 8,5 Mtep/an ;
- bois énergie pour l'industrie : 0,9 Mtep/an ;
- valorisation énergétique des déchets organiques et résidus animaux : 0,7 Mtep/an ;
- chauffage au bois urbain et tertiaire : 0,4 Mtep/an ;
- biocarburants : 0,35 Mtep/an ;
- biogaz : 0,15 Mtep/an ;
- substituts pétroliers en chimie : 0,1 Mtep/an.

1.1.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire peut être utilisée directement pour le chauffage au travers de deux techniques : L'utilisation dite passive consiste en la captation directe de l'énergie solaire par les ouvertures vitrées du bâtiment ou au travers d'isolants transparents aux fins de réduction des besoins thermiques et des besoins d'éclairage de jour. Cette utilisation, couplée à une bonne isolation, peut réduire les besoins thermiques jusqu'à 20 kWh/m²an sur des logements neufs (moyenne en climat européen) ou 50 kWh/m²an

sur des logements existants. L'autre technique est l'utilisation de capteurs servant au chauffage de l'eau sanitaire. Un chauffe-eau solaire destiné à une famille-type de quatre personnes est composé de 4 m² de capteurs solaires et d'un accumulateur d'eau chaude de 200 litres. Il coûte actuellement de l'ordre de 3 000 à 3 800 euros TTC installé. Les capteurs solaires peuvent aussi servir à chauffer l'habitat. De nombreux pays ont mis en place des programmes de diffusion de chauffe-eau solaires dans le résidentiel et le tertiaire. En France le programme mis en place par l'ADEME vise un objectif de 550 000 m² de capteurs installés en 2006.

1. Énergies renouvelables par région (1997-2020) (hors usages traditionnels de la biomasse)

	1997 (Mtep)	2020 (Mtep)	Taux de croissance annuel (1997-2020)
Énergie primaire			
Monde	189	361	2,8 %
OCDE	174	309	2,5 %
• Europe	64	137	3,4 %
• Amérique du Nord	91	132	1,6 %
• Pacifique	19	40	3,3 %
Économies en transition	0	1	15,8 %
Pays en développement	15	50	5,3 %
• Chine	0	3	—
• Asie de l'Est	9	33	6,0 %
• Asie du Sud	0	1	26,9 %
• Amérique latine	6	10	2,1 %
• Moyen Orient	1	1	2,3 %
• Afrique	0	3	8,5 %

Source : AIE, 2001.

1.1.3. La géothermie

Les nappes d'eau souterraines peuvent être utilisées à des fins de chauffage soit indirectement via des pompes à chaleur si leur température est inférieure à 30° C, soit directement si la température est plus élevée ou si les besoins à satisfaire ne nécessitent pas des températures très élevées (pisciculture, aquaculture, piscine, etc.). Les coûts de forage, avec éventuellement un second forage pour réinjection si l'eau est trop chargée en sels, réservent l'usage de la géothermie à des installations de moyenne et grande puissances (immeubles collectifs ou tertiaires, réseaux de chaleur). C'est le cas en France où environ 160 000 équivalents logements sont chauffés par la géothermie. L'aquifère le plus connu est celui du Dogger dont la

température est de l'ordre de 85° C à une profondeur de 1 500 à 1 800 m. La géothermie peut aujourd'hui fournir de la chaleur à des conditions tout à fait compétitives. Dans le cas assez difficile de la région parisienne (forage profond et réinjection), le coût du MWh thermique livré au réseau est de l'ordre de 12 euros pour une opération-type.

1.2. La production d'électricité à partir de sources renouvelables : état de l'art

On retiendra ici la géothermie, la bioélectricité, l'hydroélectricité, l'énergie éolienne, la conversion thermodynamique de l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. D'autres technologies sont envisageables dans l'avenir telles que l'exploitation de l'énergie des vagues ou des courants marins. Elles recèlent un potentiel considérable mais leur état de développement ne permet pas aujourd'hui de cerner de façon réaliste leur économie future. L'énergie marémotrice, quant à elle, malgré un potentiel technique et la réussite de l'installation de la Rance – 240 mégawatt (MW) électrique, ci-après MWe⁽¹⁾ –, semble avoir de trop grands impacts environnementaux pour pouvoir être développée. La production mondiale d'électricité était en 1998 de 14 183 térawattheure (TWh) dont 20 % par énergies renouvelables, essentiellement du fait de l'hydroélectricité.

1.2.1. Production d'électricité à partir d'un système géothermal

Elle est possible à partir de gisements à haute température (> 150° C) ou à moyenne température (90 à 150° C). Pour la haute température, suivant le caractère corrosif ou non corrosif du fluide géothermal, on utilise un cycle indirect ou direct avec une turbine à vapeur. Les coûts du kWh produit sont de l'ordre de 0,03 euro pour la haute température et de 0,06 euro pour la moyenne température. La puissance installée dans le monde est passée de 5 831 MWe en 1990 à 7 171 MWe en 1996 et 8 340 MWe en 1998. L'énergie produite était de 42,3 TWh en 1998, soit 0,3 % de la production mondiale.

Les ressources à haute et moyenne températures se trouvent dans des régions volcaniques ou de magmatisme récent. En France, les ressources à hautes températures se trouvent dans les départements d'outre-mer, mais des ressources moyennes températures existent en métropole. Le potentiel exploitable en France à court terme est estimé à 400 MWe, soit une production possible de 3 TWh/an. Les perspectives technologiques viennent de l'exploitation possible des roches chaudes sèches et fracturées, selon l'expérimentation en cours à Soultz (Alsace), par injection et récupération d'un fluide caloporteur à grande profondeur. La faisabilité économique de ce concept élargirait considérablement le potentiel d'exploitation de la géothermie. Il devrait être industriellement exploitable dans les années 2010.

(1) Les MWe correspondent à la puissance électrique fournie par une installation de production ou conversion en électricité (inférieure à la puissance thermique lorsque l'on transforme de la chaleur en électricité).

1.2.2. Bioélectricité

Il y a plusieurs façons de produire de l'électricité à partir de la biomasse :

- combustion directe : eau chaude/vapeur = cogénération via une turbine ;
- gazéification : turbine ou moteur ;
- pyrolyse : turbine ou moteur ;
- digestion anaérobie : gaz méthane pour turbine ou moteur ;
- reformage (par exemple, à partir de bioéthanol) en vue d'alimenter une pile à combustible.

Les procédés de gazéification et de pyrolyse doivent encore confirmer leur fiabilité industrielle. Dans l'immédiat, les seules voies accessibles et déjà développées de production de bioélectricité sont la combustion directe avec cogénération et la méthanisation, si possible avec cogénération également.

Les coûts de production du kWh sont de l'ordre de 0,07 à 0,11 euro en cogénération (c'est-à-dire avec une valorisation conjointe optimale de la chaleur) sur base d'un coût de combustible rendu sur site de 50 euros par tonne sèche. Ils sont évidemment très dépendants du coût du combustible et du prix de la chaleur valorisée, donc du prix du gaz et du pétrole. Dans certains cas, ce combustible peut être considéré comme un déchet fatal à éliminer sur le site même. Son coût est alors nul. Le prix moyen pour la production d'électricité à partir de gaz de décharge était ainsi, par exemple de 0,04 euro/kWh dans le cadre de l'appel à proposition britannique « *Non Fossil Fuel Obligation* (NFFO 5) ». Mais la plupart du temps la biomasse doit être collectée, voire conditionnée (broyage) ou même produite (culture). Dans ce cas, NFFO 5 prévoyait des tarifs allant jusqu'à 0,1 euro/kWh.

La production mondiale d'électricité à partir de la biomasse en 1998 était de 155,3 TWh, soit 1,1 % de la production mondiale. En France, elle était de 2,6 TWh. Le gisement exploitable en France est très dépendant des progrès qui seront faits dans le domaine de la gazéification. Si celle-ci devient exploitable (ce qui est probable à l'horizon 2010), la production d'électricité viendra compléter et même concurrencer les usages thermiques pour l'exploitation des 3 à 5 Mtep potentiels des résidus forestiers et de paille.

1.2.3. L'hydroélectricité

Rappelons d'abord que l'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus mature et la plus développée : 630 000 MW dans le monde, 2 672 TWh en 1998, soit 18,7 % de la production d'électricité mondiale. Cela correspond à environ 10 % du potentiel techniquement et économiquement exploitable.

La petite hydroélectricité, nous entendons par là les centrales inférieures à 10 MW et sans grande retenue, comptait, en 1997, 9 705 MW installés en Europe dont 2 004 MW en France. Son potentiel de développement au

niveau mondial est estimé à l'horizon 2020 entre 50 000 (scénario « *business as usual* ») et 70 000 MW (scénario de développement accéléré). Sur une base de 20 ans d'amortissements, 6 % de taux d'intérêt, le coût moyen du kWh est de 0,04 euro. Le gisement encore exploitable en France à des conditions acceptables des points de vue économique et environnemental est estimé à 1 000 MW, soit 4 TWh/an.

1.2.4. L'énergie éolienne

C'est la filière des énergies renouvelables qui se développe la plus rapidement aujourd'hui en termes de puissance installée : 2 278 MW en 1992, 7 636 MW en 1997, 9 615 MW en 1998, 13 356 MW en 1999, 17 542 MW en 2000 et 23 857 MW fin 2001. En termes d'énergie, la production éolienne était en 1998 de 16,4 TWh soit 0,11 % de la production mondiale. Elle aura probablement été supérieure à 40 TWh en 2001. Le coût estimé du kWh sur base d'une vitesse de vent annuelle moyenne de 7,5 m/s à 40 m de haut, un investissement de 900 euro/kW amortis sur 15 ans à 8 % de taux d'intérêt est de 0,045 euro. Il est de 0,055 euro pour une vitesse moyenne de 6 m/s. Le potentiel techniquement exploitable en France, en zones terrestres où la vitesse moyenne est supérieure à 6 m/sec est estimé à 30 000 MW, soit environ 66 TWh/an. Le potentiel exploitable en mer est supérieur mais doit encore être analysé plus finement.

1.2.5. La conversion thermodynamique de l'énergie solaire

Trois types de technologies développées ou en cours de développement :

- capteurs cylindro-paraboliques avec récepteur-tuyau (collecteurs distribués) ;
- héliostats concentrant le rayonnement sur une chaudière centralisée (tour) ;
- disque parabolique concentrant le rayonnement sur un récepteur couplé à un moteur Stirling ou une turbine.

La première technologie est bien connue par les 354 MW installés en Californie avant 1985. La technologie des centrales à tour fait l'objet de diverses expérimentations et évaluations sur la Plata-forma d'Almeria (Espagne) et d'une opération pilote à Barstow (États-Unis). Ce sont des conditions qui ne se rencontrent qu'en zones tropicales sèches, ce qui limite le champ d'utilisation de cette technologie. Le handicap du solaire thermodynamique est de ne pas disposer de niches de marchés à coloniser progressivement afin de pouvoir diminuer les coûts.

1.2.6. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

L'effet photovoltaïque permet de convertir directement de la lumière en électricité grâce à des matériaux semi-conducteurs, principalement le silicium. Les applications peuvent être :

- les systèmes de production autonomes hors réseau électrique, le plus souvent avec batteries d'accumulateurs ;

- les systèmes connectés au réseau de transport et distribution d'électricité envoyant sur le réseau l'excédent d'électricité non consommé localement.

Pour les systèmes autonomes, le coût de l'énergie est très variable suivant les configurations et les localisations. Il est supérieur à 1,5 euro/kWh. Cela paraît cher mais il faut comparer la solution photovoltaïque aux solutions alternatives qui peuvent être l'extension du réseau, le groupe électrogène, les piles ou le gaz et le pétrole dans le cas de l'éclairage et du froid. Pour les besoins vitaux de plus de 2 milliards de personnes, les générateurs photovoltaïques couplés à des appareils performants du point de vue énergétique sont souvent la solution la plus pertinente. Pour les installations connectées au réseau, le coût de l'énergie produite peut varier suivant les localisations de 0,25 euro/kWh (Europe du sud) à 0,9 euro/kWh. Ce coût de l'énergie est basé sur les coûts constatés récents dans l'Union européenne qui sont de l'ordre de 7 000 euros/kW installés.

La filière photovoltaïque est donc aujourd'hui l'une des plus chères mais c'est aussi celle dont le potentiel de développement est le plus élevé. Le 5^e Programme cadre de recherche et développement de la Commission européenne prévoyait un coût de 1 000 euros/kWc installés en 2010, soit une diminution d'un facteur 7 par rapport aux coûts constatés en 1999. Ces progrès seront possibles grâce au développement des cellules en couches minces. L'intégration des modules photovoltaïques au bâtiment est une source de progrès économique si elle confère une autre fonction à ces modules. Le constat est que la technologie actuelle du silicium cristallin n'est pas loin d'avoir atteint ses limites et que les technologies de film mince, susceptibles de baisse de prix par effet d'échelle, ne sont pas encore à même de prendre le relais. Le goulet d'étranglement est donc technologique et non dû au marché. Selon les industriels du secteur, le photovoltaïque sera compétitif avec l'électricité de pointe vers 2007 et avec la production de base vers 2025-2030. Le marché mondial annuel est passé de 3 MW en 1980 à 114 MW en 1997, 135 MW en 1998, 175 MW en 1999, 250 MW en 2000 et 310 MW en 2001.

1.2.7. Les coûts de production d'électricité et l'impact potentiel sur les émissions de CO₂

Les coûts de production de l'électricité à partir des différentes filières d'énergies renouvelables sont résumés dans le tableau 2.

Au-delà de 2020 l'évolution des coûts de production est très difficile à estimer. Le photovoltaïque ne pourrait s'avérer compétitif pour la production centralisée que si de nouvelles technologies de couches minces sont maîtrisées et si les modules peuvent s'intégrer à des structures existantes comme la peau des bâtiments. La géothermie des roches chaudes sèches pourrait également à long terme constituer une source d'énergie généralisable à l'ensemble des pays mais la faisabilité industrielle reste à démontrer. Pour ce qui concerne la biomasse la compétition sur l'usage des terres (alimentation, fibres, carburants/chimie, énergie...) sera très certainement un facteur limitant.

2. Coût de production de l'électricité à partir des énergies renouvelables

	Coût (en €/MWh)	Évolution à 2020 (en %)
Éolien	45 à 75	- 15 à - 25
Géothermie haute et moyenne température	30 à 60	- 10
Photovoltaïque connecté au réseau	250 à 900	- 30 à - 50
Biomasse (combustible à 50 €/tonne sèche)	70 à 110	- 10 à 15
Petite hydraulique	40	- 10

Sources : AIE, et ADEME.

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a évalué quelle pourrait être la contribution des énergies renouvelables à la réduction des émissions de CO₂ dans les pays de l'OCDE à l'horizon 2020. Par rapport à un scénario tendanciel, l'AIE a élaboré un scénario alternatif reposant sur un renforcement de la pénétration des énergies renouvelables dans la production d'électricité. Ce scénario conduit à une baisse de 5,8 % des émissions du secteur électrique dans l'ensemble de l'OCDE par rapport au scénario de référence (tableau 3).

3. Réduction des émissions de CO₂ par un renforcement de la place des énergies renouvelables dans la production d'électricité (OCDE) (hors grande hydraulique)

En G tonnes de CO₂

	Référence	Alternative	% réduction
Amérique du Nord	3,13	2,95	5,67
Europe	1,68	1,57	6,8
Pacifique	0,67	0,64	3,8
Total OCDE	5,47	5,16	5,8

Source : World Energy Outlook 2001, AIE.

1.3. La production composants de carburants à partir de la biomasse : état de l'art

Les « biocarburants » sont des produits issus de la biomasse et utilisables dans les moteurs. Les deux principales filières existantes sont la production d'esters à partir d'huiles végétales (colza, etc.) pour la complémentation des gazoles et la production d'éthanol ou de dérivés (éthers) comme composant des essences à partir de betteraves, de céréales, ou de sous-produits lignocellulosiques. Les programmes de développement des bio-carburants les plus importants dans le monde ont été mis en œuvre

au Brésil, aux États-Unis et en France qui est par ailleurs le *leader* mondial pour la filière « biodiesel ». À part les expériences brésiliennes (parc principalement résiduel de véhicules fonctionnant à l'éthanol pur) et allemande (parc récent de véhicule 100 % biodiesel), les biocarburants sont utilisés en mélange comme additif (1 à 5 %, pour la : lubrification ou l'oxygénation) ou comme composant (5 à 15 %).

La production européenne de biocarburants a dépassé 1 000 000 de tonnes en 2000 dont 40 % en France et 30 % en Allemagne. Elle pourrait être multipliée par 5 à l'horizon 2010 selon les projets de directive de l'Union européenne. Les coûts de production, en réduction constante grâce également à la valorisation croissante des co-produits (tourteaux, drèches, glycérol) avoisinent aujourd'hui 0,4 euro/litre en moyenne soit le double de celui des carburants pétroliers (qui bien entendu, ne rémunère pas le coût de renouvellement du gisement). Le handicap de compétitivité n'est donc qu'apparent. Il a été divisé par deux en dix ans. Il serait réduit à zéro avec un prix du pétrole à 50 dollars/baril.

1.4. La situation des énergies renouvelables en France

Dans le cas de la France, la situation des énergies renouvelables est très contrastée comme on peut le voir dans l'encadré ci-après.

La Directive européenne sur la production d'électricité à partir des énergies renouvelables adoptée fin 2000 fixe des objectifs quantitatifs pour chacun des États membres. La France devra en 2010 produire 21 % de sa consommation d'électricité à partir d'énergies renouvelables contre 15 % aujourd'hui, avec une consommation qui aura probablement augmenté entre temps de 20 à 25 %. Pour y arriver, les estimations de l'ADEME montrent que, même en déployant des efforts considérables de maîtrise de la demande d'électricité (30 TWh/an en dix ans), il faudra mettre en œuvre des moyens de production nouveaux pour un total de 40 à 46 TWh/an suivant les hypothèses de croissance de la consommation. Cela pourrait se traduire par la répartition suivante :

- petite hydraulique : 1 à 4 TWh/an ;
- bioélectricité (y compris incinération ou méthanisation de déchets organiques) : 1 à 6 TWh/an selon les tarifs de rachat ;
- éolien : 11 500 à 14 000 MW et 30 à 35 TWh/an ;
- divers (géothermie, photovoltaïque) : 1 TWh/an.

C'est un objectif très ambitieux, mais aussi réaliste car correspondant au rythme actuel de développement des énergies renouvelables en Allemagne, et, si l'on tient compte de la dimension du pays, inférieur à celui du Danemark.

Contribution des énergies renouvelables en France

Total : environ 26 Mtep/an, soit environ 10 % des 250 Mtep primaires en 1998

Biomasse

11 Mtep/an (dont 2,6 TWh/an, 430 Mwe), dont :

- bois : environ 10 Mtep/an (domestique 8,5, industrie 0,9, urbain 0,4) ;
- composants de carburants : 0,35 Mtep/an ;
- biogaz : 0,15 Mtep/an.

Géothermie

0,16 Mtep (200 000 équivalents logements).

Solaire

- thermique : 400 000 m² (environ 120 gigawattheure/an – GWhth/an) ;
- photovoltaïque: 10 MW installés (0,5 sur réseau).

Hydroélectricité

70 TWh/an (env. 15 Mtep) dont 10% petite hydroélectricité (dont 4 à 5 TWh/an producteurs autonomes).

Éolien

Environ 62 MW fin 2000.

Il est légitime de se poser la question de la cohérence entre les objectifs de la Directive et les engagements français de Kyoto. En effet, le contenu en carbone de l'électricité française est faible. On pourrait penser que la production d'électricité renouvelable économisera peu de carbone. Ce serait oublier que la consommation française d'électricité augmentera d'environ 100 TWh/an d'ici 2010 et que la tendance du marché sera de fournir cette électricité supplémentaire à partir de turbines à gaz et donc d'énergie dont le contenu en carbone est non négligeable. Il y a donc un risque réel de voir le secteur électrique « grever » à nouveau fortement le bilan carbone de notre pays, réduisant d'autant les marges de manœuvres sur le bâtiment, l'industrie ou les transports.

Concernant le développement des usages thermiques de la biomasse il n'existe pas, comme pour l'électricité, de base réglementaire européenne favorisant leur développement, et c'est même parfois l'inverse (taux de TVA pénalisant les réseaux de chaleur). C'est donc par le seul jeu de leur compétitivité, appuyée par des aides aux investissements des États, que les

bioénergies se développent. La perspective du marché des permis d'émission carbone leur sera sans aucun doute très favorable et on le juge d'ores et déjà par le dynamisme du marché du bois-énergie industriel et collectif. Il est ainsi possible de prévoir ; en 2010, un accroissement de près de 50 % de la production française de bioénergies (15 contre 11 Mtep) mais le champ de développement prospectif (2020-2030) devrait assez vite plafonner aux alentours de 20 Mtep/an pour les raisons tenant aux surfaces de production disponibles.

2. Les technologies d'utilisation de l'énergie

Les technologies d'utilisation de l'énergie dans les différents secteurs de consommation devraient également bénéficier du progrès technique. L'internalisation de la valeur carbone au travers des différents instruments de politique publique peut accroître la composante « efficacité énergétique » dans le progrès technique (que ce soit au travers de la fiscalité, des normes ou autres incitations). Ainsi dans les scénarios énergétiques élaborés pour la France aux horizons 2010 et 2020⁽²⁾ la diminution annuelle moyenne de l'intensité énergétique était de l'ordre de - 1 % avec les mesures existantes et de l'ordre de - 1,7 % dans un scénario intégrant les mesures permettant de remplir les objectifs de Kyoto.

Les procédés industriels fortement consommateurs d'énergie ont, d'ores et déjà, réduit leurs consommations unitaires de façon importante depuis les années soixante-dix. Les études, lancées par l'ADEME et réalisées par le Centre d'études et de recherches sur l'énergie, montrent que les progrès scientifiques doivent permettre de faire émerger de nouvelles technologies qui conduiront à de plus amples réductions de consommation dans les années à venir. On peut citer, par exemple, le développement de l'oxy-combustion, de la combustion sans flamme ou de nouveaux concepts d'échangeurs thermiques. Ces études ont permis d'identifier un gisement de l'ordre de 13 millions de tonnes équivalent pétrole exploitable à l'horizon 2010 dans l'industrie (soit une réduction d'émission de CO₂ de l'ordre de 5,5 millions de tonnes de carbone). On peut aussi envisager de véritables ruptures technologiques comme l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique dans certaines industries.

Dans le secteur du bâtiment (matériaux, bois, et composants de l'enveloppe) et des technologies d'utilisation de l'énergie dans les secteurs résidentiels et tertiaires (équipements de chauffage, appareils électroménagers, bureautique, éclairage...), les avancées dans les domaines des matériaux et des technologies de l'information apporteront des gains sur les consommations unitaires d'énergie. Malgré l'augmentation du confort et du parc de

(2) Commissariat général du Plan (1998) : *Trois scénarios énergétiques pour la France*, septembre.

logements les consommations d'énergie dues au chauffage résidentiel n'ont pas augmenté en France depuis le premier choc pétrolier. Des gains importants sont encore attendus avec le développement de nouveaux générateurs de chaleur (pompes à chaleur, piles à combustible). En revanche les consommations d'électricité spécifique dans le résidentiel et tertiaire (éclairage, électroménager, bureautique) augmentent assez fortement en raison du développement des nouveaux usages. Il est difficile d'anticiper l'impact global des technologies de la communication et de l'information sur les consommations globales d'énergie compte tenu de leur impact potentiellement positif au niveau des consommations unitaires et à l'inverse de l'émergence de nouveaux besoins générés par ces technologies.

Le secteur des transports constitue un domaine particulier compte tenu de la forte croissance des consommations d'énergie et des émissions qui en résultent. Les progrès techniques dans ce secteur ont déjà permis des gains substantiels de consommation unitaire. Mais la baisse des prix de l'énergie a depuis vingt ans orienté une évolution allant à l'encontre des gains acquis (montée en puissance des véhicules, multiplication des auxiliaires comme la climatisation, alourdissement des véhicules pour renforcer la sécurité).

3. Les technologies alternatives dans le secteur des transports routiers

Les enjeux liés au changement climatique devraient constituer une nouvelle force à même d'orienter le progrès technique vers des technologies plus efficaces en énergie. L'enjeu climatique se conjugue d'ailleurs avec d'autres contraintes comme la dépendance du secteur des transports vis-à-vis des ressources pétrolières et les problèmes de pollution de l'air dans les villes. C'est dans ce contexte que les constructeurs européens d'automobiles ont signé avec la Commission européenne un accord volontaire de réduction des émissions de CO₂ au km de leurs voitures neuves au niveau de 140 g/km en 2008. Une deuxième étape prévoit en 2012 d'abaisser ce niveau à 120 g/km. Il faut souligner dans le même temps l'apparition de nouvelles étapes normatives dans la réduction des émissions polluantes : 2005 pour les véhicules légers, 2008 pour les poids lourds. Les objectifs de réduction des niveaux d'émissions d'oxydes d'azote (NO_x) étant en général antinomique avec les objectifs de réduction de CO₂ dans les motorisations classiques la recherche du double objectif de réduction simultanée des NO_x et du CO₂ mobilise d'importants moyens de recherche sur des alternatives au moteur à explosion. Les principales options technologiques sur lesquelles travaillent de nombreux industriels sont :

- les moteurs à combustion avancée en particulier la combustion homogène diesel ou essence ;
- le passage à la traction électrique dans le cadre de véhicules hybrides ou électriques ;

- la production d'électricité à bord des véhicules par batteries avancées, groupe électrogène entraîné par un moteur à pistons voire une turbine à gaz, ou pile à combustible ;
- l'utilisation de carburant élaboré à partir de la biomasse c'est-à-dire à base de carbone non fossile.

La combustion homogène essence ou diesel présente l'avantage d'une bonne libération de l'énergie à basse température ce qui se traduit par un rendement élevé et des émissions particulièrement basses de NO_x (de l'ordre de 100 fois moins) et de particules (de l'ordre de 14 fois moins) par rapport aux meilleures technologies essence et diesel actuelles. Les difficultés de contrôle de la combustion sont encore grandes et il s'agit d'une technologie qui est encore au stade de la recherche, notamment dans le cadre du groupement scientifique moteur regroupant les deux constructeurs français et l'Institut français du pétrole et qui devrait arriver sur le marché vers 2010.

Le passage à la traction électrique présente l'avantage d'un rendement de l'ordre de 3 fois celui d'un ensemble moteur thermique/transmission mécanique en conditions urbaines de circulation et de permettre une récupération d'énergie au freinage, le moteur tournant alors en génératrice. Le problème principal est celui de la fourniture d'électricité à bord du véhicule. Les problèmes d'autonomie liés à la faible capacité de stockage des batteries (actuellement autonomie sur petit véhicule de 100 km avec possibilité de la porter à 250 à 300 km à un horizon de l'ordre de cinq ans grâce aux technologies de batteries au lithium) confinent de fait le véhicule électrique, dont près de 7 000 circulent actuellement en France, à des niches de marché principalement urbaines. L'autre possibilité est la production d'électricité par un alternateur entraîné par un moteur à combustion interne fonctionnant alors à son point de rendement optimum les à-coup de demande étant alors absorbés par une batterie tampon. C'est le véhicule hybride. Les avantages en matière de consommation résident dans une puissance du moteur thermique plus faible, un fonctionnement de celui-ci dans les plages optimales de consommation, et la récupération d'énergie au freinage qui peut atteindre dans de bonnes configurations jusqu'à 30 %. De tels véhicules arrivent sur le marché.

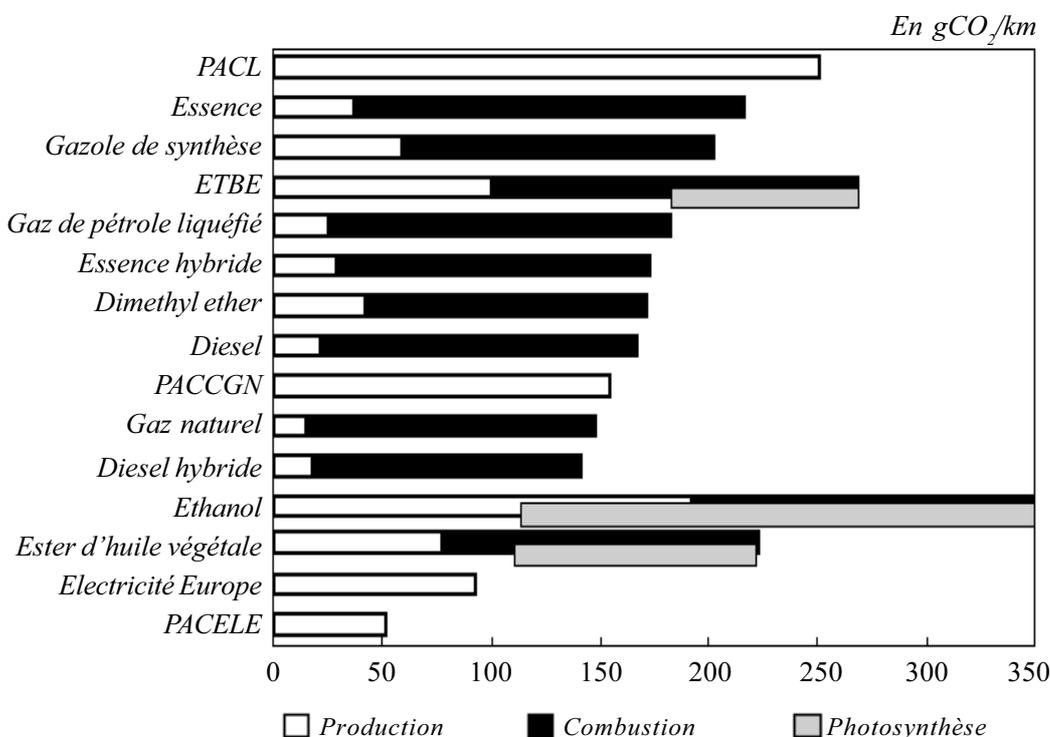
Les piles à combustible présentent l'intérêt de ne pas produire d'émissions de polluant ni de CO₂ au moment de l'utilisation et de trouver d'autres applications potentielles dans les secteurs résidentiel et tertiaire comme générateur d'électricité et de chaleur. De nombreux problèmes techniques restent cependant à résoudre pour des utilisations à bord d'un véhicule (stockage de l'hydrogène). Cela pose également le problème du bilan CO₂ pour la production, la distribution et la compression si le procédé de production d'hydrogène a recours à des combustibles fossiles. Pour contourner cette difficulté une méthode consiste à produire à bord l'hydrogène en reformant un hydrocarbure (méthanol ou éthanol, par exemple). On est alors confronté à des problèmes de rendement du réformeur, d'épuration de l'hydrogène produit et d'émission de CO₂. Si des véhicules de recherche existent il reste

encore beaucoup de travail et malgré quelques déclarations fracassantes de mise sur le marché en 2004, l'horizon prévisible se situe plutôt après 2010, voire 2015.

Ces différentes technologies exigent une mutation significative dans les formulations des carburants, désulfuration profonde notamment. Les combustibles gazeux (gaz naturel véhicule ou GNV et gaz de pétrole liquéfié ou GPL) peuvent alors avoir un rôle important en raison de leur faible rapport carbone/hydrogène qui se traduit par moins d'émission de CO₂ et plus de vapeur d'eau à l'échappement pour autant que les technologies moteurs soient convenablement adaptées, ce qui est loin d'être encore le cas. Dans ce contexte les biocarburants à base d'éthanol ou d'ester d'huile végétale ont un rôle à jouer qui sera en tout état de cause limité par les capacités de production.

Il convient toutefois d'évaluer pour chacune de ces options l'impact global sur les émissions de CO₂ sans se limiter aux seules émissions générées lors de l'utilisation. Le graphique suivant présente, pour différentes filières, les émissions comparées de CO₂ dans les usages transport.

Émissions de CO₂ « du puits à la roue » : énergies actuelles et alternatives



Note : PACL = Pile à combustible à hydrogène liquide à partir de gaz naturel ; ETBE = EthylTertioButylEther ; PACCGN = Pile à hydrogène comprimé à partir de gaz naturel ; PACELE = Pile à hydrogène comprimé à partir d'électricité (France).

Source : Institut français du pétrole (IFP).

De l'examen simultané des contraintes inhérentes à l'utilisation des différentes énergies de substitution et des contraintes d'utilisation des véhicules, notamment en matière de stockage de l'énergie et de l'autonomie des véhicules, deux grandes conclusions peuvent être tirées :

- aucune des filières n'est apte à elle seule à assurer une substitution massive, les potentialités de chacune des filières électricité, gaz et biocarburants tournant autour de 7 à 8 %. Il est donc nécessaire de développer toutes les filières pour obtenir un niveau significatif de substitution, environ 20 % ;

- chacune des filières a ses mérites propres du point de vue de la dépollution et de la réduction de l'effet de serre, il faut donc les utiliser là où elles ont un maximum d'atouts face aux contraintes que supposent leur utilisation : véhicules électriques pour les faibles besoins d'autonomie en ville avec arrêts fréquents, GNV et GPL en ville pour leurs bonnes performances en matière d'émissions, biocarburants comme additif dans les carburants classiques pour la recyclabilité de leur carbone et l'amélioration de leur formulation – substitution de l'EthylTertioButylEther (ETBE) au benzène dans les essences et de l'Esther méthylique de colza (EMC) comme lubrifiant des pompes d'injection dans les gazoles à très basse teneur en soufre.

Il est nécessaire d'avoir à l'esprit des valeurs repères concernant la pénétration sur le marché des technologies : sous l'effet des progrès en matière de qualité de fabrication réalisés dans la dernière décennie par les constructeurs et la robustesse des technologies utilisées, le parc se renouvelle de plus en plus lentement. Les études de dynamique de pénétration et de renouvellement montrent ainsi que si une technologie arrive sur le marché à l'instant t_0 elle équipera toutes les voitures neuves au bout de 15 ans, 50 % du parc au bout de 13 ans et 95 % du parc au bout de 25 ans.

Résumé

Dix années après le Sommet de Rio de Janeiro, où les pays développés ont décidé de réagir à la menace du changement climatique, cinq années après l'accord de Kyoto, où ils ont pris des engagements quantitatifs pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, et alors qu'Europe et États-Unis s'opposent sur la mise en place du Protocole de Kyoto, ce rapport éclaire les enjeux économiques du réchauffement climatique. Son objectif n'est pas d'entrer dans les arcanes des négociations à court terme, mais de nourrir une réflexion stratégique et prospective.

L'effet de serre soulève de nombreuses questions de politique économique. Face à la persistance de multiples incertitudes sur les effets du réchauffement climatique, comment agir, en particulier pour tenir compte de l'irréversibilité ou de la faible réversibilité de la croissance des concentrations des gaz à effet de serre et du réchauffement qu'ils induisent ? L'architecture de Kyoto est-elle fondamentalement mauvaise, comme le dit l'Administration américaine, ou le Protocole concrétise-t-il une approche ambitieuse et constructive comme le pensent d'autres pays ? Quelle politique mettre en place, alors que des pays ne participeront pas aux efforts de contrôle des émissions tout en bénéficiant de la préservation de ce bien collectif global qu'est le climat ? Comment protéger la compétitivité des pays qui imposeront ainsi des contraintes environnementales à leurs producteurs ?

La lutte contre le changement climatique soulève en outre des débats éthiques quant à la juste répartition des droits à émettre des polluants au niveau international, et la nécessité de concilier une lutte globale avec le développement économique d'une large partie de la planète. Enfin, la nécessité de nouvelles règles et institutions pour faire respecter des engagements renvoie au problème plus large de la gouvernance mondiale.

Peu de certitudes, mais des risques majeurs

La mobilisation des spécialistes du climat a fait progresser de façon décisive la connaissance du phénomène de l'effet de serre. Malgré leur prudence traditionnelle, les scientifiques s'accordent généralement pour déceler derrière les évolutions climatiques récentes les prémices d'un réchauffement de grande ampleur. Les émissions des gaz à effet de serre depuis le début

de la révolution industrielle se sont intensifiées. Face à cela, la régulation naturelle de la planète paraît bien insuffisante : seule une partie, environ la moitié, des gaz émis est piégée par la biosphère (croissance plus élevée des arbres) et par l'océan. L'autre moitié s'accumule dans l'atmosphère et contribue au réchauffement observé pendant le dernier siècle. Le parallélisme de la croissance des concentrations et de celle des températures est en tous cas spectaculaire.

Les études récentes conduisent à penser qu'à la fin du siècle, la température moyenne sur la planète s'élèverait de 3 à 6 degrés *Celsius* si aucune mesure était prise. Il en résulterait une élévation du niveau de la mer, la disparition de certaines régions émergées, la désertification de certaines zones et une variabilité plus grande du climat. Les risques de modifications profondes du système climatique sont envisageables, sans que l'on puisse à ce stade les probabiliser. Les phénomènes physiques sont d'autant plus difficilement prévisibles qu'ils sont hautement non linéaires : la menace d'une modification de la circulation océanique, avec un *Gulf Stream* qui ne viendrait plus réguler le climat de l'Europe de l'Ouest, est plausible, même si ce n'est pas à court terme. L'emballage de l'effet de serre, avec le réchauffement de surfaces actuellement gelées qui émettraient ainsi des gaz contenus dans les sols, avec des océans plus chauds qui absorberaient moins de carbone atmosphérique, avec la fonte des calottes glaciaires qui réfléchirait moins les rayonnements, sont des menaces potentielles. En soulignant les risques extrêmes les plus spectaculaires, qui constituent l'incontournable toile de fond du problème, il faut noter que les fourchettes que peuvent nous donner les scientifiques (accroissement de la température, montée des océans) sont larges. En outre, à niveau global donné, il semble actuellement très difficile de prévoir les conséquences locales d'un réchauffement de la planète. L'évaluation de la plausibilité et de l'intensité des extrêmes climatiques (cyclones, etc.) qui ont un coût économique direct, est entachée de larges incertitudes.

La méconnaissance des effets du réchauffement figure parmi les arguments invoqués par l'administration américaine pour refuser l'architecture de lutte contre l'effet de serre adoptée à Kyoto. Que l'argument justifie l'inaction est douteux, dès lors qu'il est tout aussi possible que l'on sous-estime les dommages qu'on ne les surestime.

Quelle action face à l'effet de serre ?

Même une réduction drastique des émissions n'aurait qu'un impact limité à court terme. À l'horizon d'un siècle, le niveau des mers monterait tout de même et la planète se réchaufferait (de l'ordre de respectivement 1,4 à 2,6 degrés, si l'on stabilisait la teneur en CO₂ à deux fois son niveau actuel, ce qui imposerait des efforts considérables de réduction des émissions). À quoi bon, peut-on penser, faire subir les coûts économiques de la lutte contre l'effet de serre aux générations proches, pour le bénéfice de

générations très éloignées ? Celles-ci ne seront-elles pas plus riches, et faut-il consentir à leur profit un transfert de richesse qui paraît peu équitable ? N'y a-t-il pas des moyens plus sûrs pour accroître un « bien-être planétaire agrégé », par exemple en consacrant ces mêmes sommes à l'eau, l'éducation ou à la santé ? Enfin, ne serait-il pas illogique d'intervenir pour le bénéfice de générations éloignées, alors que l'on fait si peu pour certaines populations actuelles de la planète ?

Pour répondre à ces questions, il faut, sans oublier les considérations éthiques qui commandent de laisser aux générations futures un « vaisseau spatial Terre » en bon état, faire appel à l'analyse et au calcul économique. Le calcul intertemporel recommande d'accentuer l'effort aux périodes où il est le moins coûteux. Faut-il pour autant retarder l'action jusqu'à l'arrivée d'opportunités technologiques ? Il est vrai que le salut à long terme ne viendra que du progrès technique et qu'investir dans la recherche est essentiel. Néanmoins, le ralentissement de l'accumulation des gaz à effet de serre laisse davantage de temps pour le mûrissement des solutions techniques. L'engagement précoce de l'action crédibilise la volonté politique et fournit des perspectives de rentabilité favorable à la recherche. À ce titre, incitations économiques à la réduction des émissions et recherche de nouvelles solutions techniques apparaissent beaucoup plus comme des instruments complémentaires que comme l'alternative décrite par l'Administration américaine.

Les coûts d'une politique efficace de lutte contre l'effet de serre ne peuvent être considérés comme négligeables. Les simulations divergent selon les modèles et les scénarios retenus, mais le coût de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto est souvent estimé à quelques dixièmes de point de produit intérieur brut (PIB) (soulignons cependant que les coûts, souvent exprimés par rapport au PIB plutôt qu'en unité monétaire par souci de lisibilité, correspondent à un prélèvement, mais qui ne modifierait pas le taux de croissance de l'économie si les changements sont suffisamment graduels pour être anticipés). Ces coûts croissent à la marge, lorsqu'on accroît l'effort. Un premier ensemble d'actions relativement peu coûteuses peut donc être mis en œuvre dans les pays développés. Ces premières mesures, en particulier si l'on tient compte des effets de rétroaction sur les prix et sur le progrès technique induit, sont de rentabilité supérieure aux actions alternatives, recherche comprise. Si l'on ajoute à cet argumentaire les vertus d'un affichage précoce et fort de priorités collectives pour changer les anticipations tant des pollueurs que des innovateurs, la mise en place sans délai d'une action collective sur l'effet de serre est aujourd'hui pleinement justifiée.

Globalement, l'ampleur de l'effort initialement envisagé à Kyoto se situait dans une fourchette raisonnable. La nature de l'incertitude et l'horizon temporel rendent difficile l'analyse coûts-bénéfices et le calibrage de l'effort optimal, mais les arguments concluant que Kyoto met en œuvre un freinage trop rapide reposent sur un calcul économique simpliste. Les dommages de l'effet de serre ne sont pas limités aux effets directs. Le calcul économique doit intégrer l'aversion aux risques, en tenant compte convena-

blement de risques extrêmes, qui sont à la fois catastrophiques et de faible probabilité. En présence d'irréversibilités, il est également nécessaire de prendre en compte des valeurs d'options, et en particulier du fait qu'il peut exister une « fenêtre de tir » qui va se fermer, si l'on n'agit pas. Il faut ainsi intégrer au calcul la perspective de l'arrivée d'informations nouvelles. L'information arrivant ultérieurement (par exemple sur le fait que telle concentration de CO₂ présente des dangers supérieurs à ce que l'on anticipait) peut alors nous obliger à un freinage des émissions très coûteux sans que les effets d'une information inverse soient symétriques (le fait d'avoir surestimé les dangers a pu se traduire par un freinage des émissions certes excessif mais moins dommageable et coûteux). L'option d'éviter des surcoûts imposés à la génération suivante peut justifier une décélération certes progressive mais immédiatement significative des émissions de gaz à effet de serre. À ce titre, on peut dire que l'action décidée à Kyoto n'est pas trop précoce – au contraire, idéalement, elle a été clairement tardive – et que l'ampleur de l'effort demandé est dans une fourchette raisonnable.

L'architecture de Kyoto

La mise en œuvre des réductions d'émissions dans le cadre de Kyoto à laquelle se sont soustraits les États-Unis, répond à des engagements quantitatifs portant sur le volume d'émissions. Le choix d'un instrument de régulation des quantités (plafond associé à des permis) par rapport à un instrument de prix (taxes carbone) mérite discussion. En présence d'incertitudes sur les coûts des dommages et le coût de réduction des émissions, les deux instruments ne sont pas équivalents. En particulier, le fait que l'espérance des dommages soit, pour les trois ou quatre générations à venir, relativement peu sensible à l'effort de réduction des émissions (le réchauffement est un phénomène lié au stock de CO₂, peu lié aux flux à cet horizon), et que les coûts soient aussi incertains à ce terme, constitue un argument en faveur du choix de l'instrument prix. Celui-ci permet une modulation de l'effort pour tenir compte de la réalité des coûts, là où les quotas sont trop rigides. Néanmoins, tous critères inclus, l'architecture adoptée à Kyoto a de sérieux mérites :

- la fixation de quantités introduit une lisibilité plus grande sur les objectifs. Elle soustrait l'action collective aux rétroactions compensatoires systématiques et aux aléas des variations des prix à la source des produits énergétiques ;
- un système pur de taxes est beaucoup moins acceptable pour les pays en développement comme pour les pays comme l'ex-Union soviétique. La fixation des quotas nationaux permet de refléter les situations particulières des pays, leur exposition variable au risque climatique et les besoins de leur développement ;
- l'autorisation de transactions internationales sur les droits d'émission réduit considérablement le coût économique des mesures (globalement d'un facteur de l'ordre de deux, même s'il varie selon les pays, les modèles et les scénarios), parce qu'elle permet de réaliser les réductions d'émission là où

elles sont le moins coûteuses. Les marchés de permis auront aussi le mérite de faire émerger un prix international du carbone (atmosphérique), que les opérateurs peuvent intégrer dans leur raisonnement. Les objections de nature morale à ces marchés de permis d'émission cristallisent parfois leur argumentaire autour d'un vocabulaire malheureux (ces marchés sont parfois qualifiés de marchés de « droits à polluer »), oubliant qu'ils substituent des droits limités et coûteux à des droits à polluer antérieurs qui étaient illimités et gratuits.

Kyoto pourrait cependant être amélioré par la fixation d'un prix plafond (fourniture garantie de permis assurée quand le prix du marché dépasse ce seuil) et d'un prix plancher sur le marché de permis. En contribuant à stabiliser les anticipations des agents sur un marché nouveau dont les conditions de fonctionnement sont aujourd'hui partiellement inconnues, en évitant que les fluctuations des conditions de la lutte n'exacerbent les coûts économiques, l'innovation proposée serait de nature à améliorer l'acceptabilité de l'accord.

Après un examen critique de son architecture, ce rapport plaide donc pour tenter de faire vivre le Protocole de Kyoto, plutôt que de le rejeter, quitte à l'aménager. Les propositions réellement alternatives paraissent avoir peu d'intérêt.

Comment allouer les droits d'émission ?

Un problème crucial dans ce type d'architecture est celui de l'allocation initiale des droits d'émission. Une allocation reproduisant étroitement les émissions passées (« *grandfathering* » dans le langage des négociateurs) soulève des questions d'équité internationale : la pollution actuelle est principalement le fait d'un faible nombre de pays développés qui se verraient affecter des droits élevés, alors que développement futur des autres serait bridé par des droits faibles.

Néanmoins, il y a de bons arguments pour ne pas remettre trop brusquement en cause la répartition actuelle. Une telle remise en cause serait inefficace sur un plan économique. Sur un plan politique, elle compromettrait l'adhésion des pays émetteurs à un accord global. De ce point de vue, l'effort demandé par Kyoto aux États-Unis, par rapport à ses perspectives d'émission futures, se traduisait par des efforts très importants, et pouvait à ce titre être « excessif », même si ce pays est le principal émetteur de gaz à effet de serre. La question du « *grandfathering* » se pose aussi au niveau interne, à l'intérieur des pays qui participent à la lutte contre l'effet de serre, et les mêmes arguments peuvent être invoqués. Tenir compte des émissions actuelles dans l'attribution des permis correspond en outre à une sorte de « contrat implicite » passé, vis-à-vis des producteurs.

À la fois au niveau interne et au niveau international, des transitions douces pouvant être anticipées à l'avance par les agents économiques pourront permettre de contenir les coûts d'ajustements macroéconomiques. La

conciliation du caractère opérationnel et de l'équité plaident donc dans tous les cas pour une modification lente des droits de propriété implicites existants.

Cependant, à l'intérieur d'un pays, les droits de propriété transférés aux entreprises devraient rester provisoires et transitoires. Au niveau international, l'évolution à long terme de quotas nationaux tels que Kyoto les définit est plus problématique. Une vision quelque peu optimiste ou utopique de l'accord de type Kyoto, conduirait à faire reposer à long terme, l'allocation de référence sur une logique plus « égalitaire », avec par exemple une affectation des droits nationaux d'émission sur la base de la population du pays. En fait, l'efficacité des arrangements sera d'autant plus grande que les principes de l'allocation des droits à long terme seront arrêtés plus tôt, étant entendu que ces principes devraient concilier une certaine logique égalitaire avec les contraintes de réalisme politique. Les scénarios dits de « contraction et convergence » vers un niveau d'émission par tête uniforme à l'horizon soixante-dix ans, décrits dans un complément du rapport, imposeraient en effet des efforts considérables et politiquement peu plausibles aux États-Unis, mais aussi à d'autres pays dont l'industrie et les transports devraient se développer de manière importante.

À moyen terme, un problème plus urgent doit être résolu, celui de l'intégration des pays en développement dans l'architecture Kyoto. La solution adoptée pour associer dans le cadre actuel les pays en développement repose sur ce qu'on appelle le mécanisme de développement propre (MDP) de Kyoto (crédit d'émission pour les pays développés dits de l'Annexe B, lorsqu'ils investissent dans des projets réduisant les émissions d'un pays en développement). Cette solution a sans doute des mérites politiques mais elle est économiquement peu satisfaisante (trop complexe et potentiellement génératrice d'effets pervers).

Les enjeux de l'intégration des PED à la mécanique Kyoto sont considérables : son échec signifierait l'échec de la formule Kyoto ; sa réussite au contraire en assurerait la pérennité. Les propositions du rapport dans ce domaine clé reposent sur deux constats. D'une part, il est choquant de demander à l'Inde de payer pour réduire ses émissions de CO₂ qui sont par tête seize fois moindres que celles de l'Amérique. D'autre part, une réduction significative des émissions est compatible avec des quotas généreux donnés aux PED : ceux-ci adopteraient alors des techniques moins polluantes, relativement peu coûteuses chez eux, et se placeraient en vendeurs nets de droits d'émission de carbone. La solution leur assurerait des transferts significatifs en provenance des pays développés tout en atténuant l'effort de ceux-ci. Un accord « gagnant-gagnant » entre pays développés et PED est donc possible.

Concrétiser un tel accord ne sera cependant pas aisé. Un des messages centraux de ce rapport est qu'il est nécessaire de présenter des solutions économiquement séduisantes aux pays en développement pour faire vivre un accord sur le changement climatique et pouvoir aller au-delà de Kyoto. Ces solutions doivent être suffisamment généreuses à court terme pour susciter l'adhésion de ces pays à l'architecture de Kyoto. Ceci peut passer par

l'allocation de plafonds non contraignants ou de quotas supérieurs aux émissions actuelles pour ces pays. Mais en même temps, elles doivent donner de solides garanties sur les règles du jeu à moyen terme, pour être non une carotte temporaire, mais servir de moteur à une adoption de stratégies favorables à l'environnement par les pays en développement.

Les problèmes de gouvernance

Il y a derrière les politiques de l'effet de serre un problème plus général de gouvernance mondiale qui a trois dimensions. D'abord, la participation : chacun a intérêt à se retirer si les autres adhèrent (le problème du passage clandestin, dans le vocabulaire des économistes). Chacun compte donc sur les efforts des autres pays pour lutter contre le réchauffement climatique sans en subir lui-même les coûts. Susciter l'adhésion de la Russie ou des pays en développement en leur accordant des permis généreux, qu'ils pourront revendre, risquerait aussi d'encourager des stratégies opportunistes, si une discipline de long terme adéquate n'était pas imposée. Enfin, les instruments de lutte contre l'effet de serre accroissent les coûts pour les industries émettrices (taxes ou achats de permis) créant des distorsions de concurrence dès lors que certains pays ne sont pas soumis à la discipline commune.

L'architecture de Kyoto, avec des objectifs de quantité et un système d'échange de permis au niveau international, ne préjuge pas des politiques qui peuvent être mises en place au niveau national. Un système interne de prix, permettant de lutter contre l'effet de serre sans pénaliser les produits nationaux vis-à-vis des produits importés, au travers d'une fiscalité carbone déductible à l'exportation pourrait ainsi être envisageable. Elle serait cependant complexe et difficile à mettre en œuvre. Elle le serait sans doute encore plus pour les autres gaz à effet de serre que le CO₂, pour lesquels on ne peut gérer les émissions « à l'amont », comme on pourrait le faire par une taxe sur les carburants fossiles, par exemple (une fiscalité traquant les émissions sur les produits finis qui ne créerait pas de distorsions nécessiterait une comptabilité matière, du type comptabilité carbone).

Plus fondamentalement, il paraît nécessaire de réfléchir sur une modification des règles du commerce international de manière à mieux articuler accès au marché et la défense du climat. Modifier certains articles de l'Accord général sur le commerce et les droits de douane (GATT), dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce, pourrait faciliter cette articulation et réduire les effets néfastes des comportements de « passager clandestin » de certains pays. Pour un bien collectif global comme l'est la qualité du climat, le plaidoyer en faveur de clauses d'exemption aux règles d'accès au marché pour des produits en provenance de pays refusant de se plier à une discipline peut développer un argument fort : à défaut, la compétitivité accrue de ces produits et leur plus grande part de marché se traduiraient par plus de pollution à l'échelle de la planète. La réforme plaidée serait loin d'être mineure et sans doute peu consensuelle. Peut-être faut-il plus généralement envisager à terme une globalisation des accords interna-

tionaux, en particulier ceux concernant le commerce et ceux concernant les biens publics globaux. La réflexion économique suggère que l'extension du domaine de la négociation pourrait en l'occurrence accroître l'espace des accords mutuellement avantageux.

Enfin, Kyoto doit être complété par un volet ambitieux de coopération technologique au niveau communautaire. Seule une politique volontaire de recherche sur de nouvelles formes d'énergie et des stratégies de capture du carbone est susceptible de répondre aux défis de long terme. En ce domaine, il est nécessaire pour l'Union européenne d'affirmer une autonomie intellectuelle susceptible de remettre en cause la position hégémonique des États-Unis dans la recherche technologique mais aussi dans la réflexion sur les politiques climatiques.

Ce rapport de Roger Guesnerie est discuté par Paul Champsaur et Alain Lipietz.

Il s'appuie sur un ensemble de compléments qui traitent des points les plus importants :

- Philippe Jean-Baptiste, Philippe Ciais, Jean-Claude Duplessy, Jean Jouzel (Institut Pierre-Simon Laplace) font le point sur les certitudes et incertitudes scientifiques sur le changement climatique ;
- Philippe Ambrosi et Jean-Charles Hourcade (Centre national de la recherche scientifique), discutent les coûts des dommages liés à l'effet de serre ;
- Patrick Criqui (Université de Grenoble), Marc Vielle (Commissariat à l'énergie atomique) et Laurent Viguié (Université de Genève) décrivent les résultats de scénarios de lutte contre l'effet de serre donnés par les différents modèles disponibles, et se livrent à une analyse des coûts des politiques climatiques ;
- Franck Lecocq (Banque mondiale) et Jean-Charles Hourcade traitent de la façon de prendre en compte l'incertitude, les irréversibilités et l'actualisation dans les calculs économiques sur l'effet de serre ;
- Cédric Philibert (Agence internationale de l'énergie) fait le point sur les divers instruments de lutte contre l'effet de serre, et présente les avantages et inconvénients d'instruments de prix (taxes) et quantités (permis d'émission) ;
- Christine Cros (Secrétariat général du Comité interministériel pour les questions de coopération économique européenne) et Sylviane Gastaldo (ministère de l'Écologie et du Développement durable) décrivent les expériences de marchés de permis d'émission et les perspectives pour l'effet de serre ;
- Jean-Louis Bal, François Moisan et Alain Morcheoine (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) font le point sur les perspectives technologiques, les perspectives de substitutions aux énergies fossiles.

L'ensemble de ces compléments au rapport apporte une information essentielle pour saisir l'ensemble des questions complexes soulevées par l'effet de serre.

Summary

Kyoto and the Economics of Global Warming

Ten years after the Rio de Janeiro summit, where developed countries decided to tackle the issue of climate change, five years after the setting of quantitative targets for reducing greenhouse gas emissions in Kyoto, and while Europe and the United States disagree on the implementation of the Kyoto Protocol, the report sheds light on the economic issues surrounding climate change. The objective is not to deal with short-term negotiations but to fuel a longer term reflexion.

Climate change raises many questions dealing with economic policy. Given the large uncertainties surrounding the impact of global warming, and the low reversibility of the increasing concentration of greenhouse gases, what is the right agenda for action? Is the architecture of the Kyoto Protocol fundamentally flawed, as argued by the US Administration? How to deal with countries that will not participate in the effort for controlling emissions, while enjoying the benefits of the preservation of the climate, a collective good? How to protect the competitiveness of countries that impose environmental constraints on their producers?

In addition, the fight against climate change raises ethical issues regarding the fair allocation of emission rights for greenhouse gases at the international level, and the need to combine a global effort with the economic development of a large part of the planet. Finally, the need for new disciplines and institutions in order to ensure that commitments are respected raises the broader issue of governance at the international level.

Few certainties, but some major risks

The mobilization of climate specialists has resulted in considerable progress in the knowledge of the greenhouse effect. Scientists remain careful in front of major uncertainties, but most of them now agree that the recent trends in climate changes reveal the beginning of a large phenomenon of global warming. The emission of greenhouse gases has increased dramatically

since the industrial revolution. The natural regulation mechanisms of the planet are not able to cope with such emissions: only half of the gases emitted are captured in natural sinks in the continental biosphere (trees growing faster) and in the ocean. The other half accumulates in the atmosphere and contributes to the increase in temperature that has been observed during the last century. The parallel between the growth in greenhouse gas concentration and the increase in temperature is, at least, spectacular.

Recent studies suggest that at the end of the century, the average earth temperature will experience an increase of 3 to 6 degrees *celsius* if no measure is taken. This would result in an increase in the sea level, the disappearance of some emerged land, the desertification of some areas and an increase in climate variability. There are also potential risks of profound modifications of the climate system, even though it does not seem possible to assess their probability at this stage. The physical mechanisms involved are highly non linear and therefore difficult to predict. Changes in the oceanic circulation, with the Gulf Stream that would no longer regulate the climate of Western Europe are plausible, even if such changes are unlikely in the short run. Cumulative emissions that would get out of control are a potential threat, if frozen areas should warm up and free greenhouses gases presently held in topsoil, or if warmer oceans should absorb less atmospheric carbon, or if polar ice caps should melt and reflect less solar rays. However, the range of estimates of temperature and sea level changes is large, and scientists are so far unable to predict with precision local consequences of an average increase of temperature. Predictions of the likelihood as well as of the intensity of extreme events such as hurricanes and tornadoes are also surrounded by large uncertainty.

The poor knowledge of the consequences and costs of global warming is one of the main arguments of the US Administration to reject the architecture of the discipline to limit greenhouse gas emissions adopted in Kyoto. This argument, however, can hardly justify inaction, given that it is equally possible that the damages of global warming be underestimated as well as overestimated.

What action against global warming?

Even a dramatic reduction in greenhouse gas emissions would only have a limited impact in the short-run. At the end of the century, the average sea level would still increase, and the earth would still become warmer (roughly by 1.4 to 2.6 degrees if one could stabilize the level of CO₂ at twice the present concentration, a scenario that would impose a considerable effort for reducing emissions). What is the point of imposing the costs of limiting emissions to the present generation, for the benefit of (remote) future generations? Why transfer wealth to future generations that are likely to be richer than the present ones, and would that be fair? Isn't there any way to increase the 'global world welfare' in a safer and more efficient way, for example by using the same amount of money for education, water supply or

health programs? Is it consistent to act for the benefit of future generations, while we do so little for certain present populations of the planet?

Intertemporal economic analysis recommends to emphasize the emission reduction effort when it is less costly. Is this a motivation to delay action until new technologies appear? It is clear that the solution, in the long-run, can only come from technological progress and that investing in research is crucial. However, slowing the accumulation of greenhouse gases leaves more time for technical solutions to emerge. Early commitment to act makes the willingness to fight global warming more credible. It also provides profitable perspectives for investing in research. From this point of view, economic incentives to reduce emissions of greenhouse gases and investment in research of technical solutions are two policy instruments that are complementary rather than alternative, as described by the US Administration.

The costs of an efficient policy against global warming cannot be neglected. Simulations provide diverging estimates, according to models and scenarios, but the costs of implementing the original Kyoto Protocol is often estimated to amount to a few tenths of a percent of the Gross Domestic Product (GDP). It is noteworthy, though, that the costs are often expressed as a percentage of GDP rather than in dollars for comparability reasons, but they correspond to a draw on the economy that would not modify the growth rate of the economy if the changes are introduced gradually enough to be expected by agents. The costs of the effort increases with the level of emission reduction. That is, there is set of measures involving relatively low costs that can be implemented in developed countries. Considering the feedback effects on prices and the induced technical change, this first set of measures yields a return that is higher than alternative actions, including investment in research. With the additional argument that an early posting of the priority given to the effort against global warming could modify the expectations of both polluters and innovators, the immediate implementation of a collective action against greenhouse gases emissions is well founded.

Overall, the magnitude of the effort initially planned in Kyoto was reasonable. The type of uncertainty and the peculiar time horizon involved in this issue make cost-benefit analysis difficult, and the calibration of the optimal effort particularly cumbersome. However, the analyses concluding that Kyoto involves an excessively rapid effort rely on oversimplistic calculations. The damages linked to global warming are not limited to direct effects. The economic calculation must include risk aversion and account properly for the extreme risks, that are both catastrophic and unlikely. In the presence of irreversibility, it is also necessary to account for option values, and in particular for the fact that there might exist a window of opportunity for action, that will not last. One must also take into account for the calculation, the fact that new information is likely to arrive. Future information (for example concerning the fact that such or such concentration of CO₂ involves larger hazards than expected), could require a fast decrease in emissions, which might be very costly. The opposite information (that the damages

were overestimated) could show that the initial decrease in emissions was excessive, but might eventually prove less damageable and less costly. The option of avoiding some extra costs imposed to the next generation can justify a progressive but immediate decrease in emissions of greenhouse gases. From this point of view, the action decided in Kyoto is not too early and the magnitude of the effort appears to fall in a reasonable range of estimates.

The architecture of the Kyoto Protocol

Kyoto relies on quantitative commitments, i.e. on the volume of emissions of greenhouse gases. The choice of regulating quantities (emission ceilings and permits), compared to price instruments (carbon taxes) is questionable. The two instruments are not equivalent in the presence of uncertainty regarding the cost of damages and the cost of effort, and the inertia in the damages in the medium-run, combined with uncertainty regarding the cost of effort, could lead to favor price instruments. However, a deeper analysis shows that the Kyoto architecture has several advantages:

- Setting quantity targets results in a greater visibility of the objectives. It also avoids the interference of exogenous fluctuations of oil prices on the collective action;
- Taxes are less acceptable for developing and transition countries. Setting quotas at the national level makes it possible to account for particular situations, for the different exposure of countries to the consequences of climate change, as well as for their development needs;
- The possibility of international trade in permits reduces considerably the economic cost of controlling emissions (roughly by a factor of two), by making it possible to reduce emissions where it is less costly. Markets for permits would also make apparent an international price for atmospheric carbon, that agents can include in their optimization process. Opposition to such markets for pollution rights on moral grounds is not founded.

Kyoto could nevertheless be improved by setting a ceiling price (guaranteed provision of permits when the market price exceeds this ceiling) and a floor price on the market of emission permits. Such an innovation would contribute to stabilize the expectations of the various agents, and could make the agreement more acceptable.

After a critical examination of the architecture of the Kyoto Protocol, this report argues in favor of the revitalization of the Protocol, with some improvements, rather than of its rejection. The various alternative proposals do not appear superior.

How to allocate emission rights?

A crucial issue is the initial allocation of emission rights. An allocation faithfully based on past emissions ('grandfathering' in the language of the negotiators) raises issues on international equity: the present pollution is mainly

due to a few developed countries that would benefit from large pollution rights, while future development of other countries would be constrained by low emission rights.

Nevertheless, a quick and drastic change in the present sharing of emissions would be economically inefficient, and would endanger the adherence of the largest polluters to a global agreement (from this point of view, the effort imposed by Kyoto on the United States, in view of the trend of future emissions, could be seen as 'excessive', even though this country is the main polluter). At the national level, accounting for the present level of emission in the allocation of permits also corresponds to an 'implicit past contract' between the society and producers.

Soft transitions that can be anticipated far in advance by economic agents could limit the macroeconomic adjustment costs. The combination of an efficient and fair policy pleads for a slow modification of the existing implicit property rights. Nevertheless, within a given country, transfer of property rights to firms should remain temporary and transitory. At the international level, the long-term evolution of national quotas is more problematic. An utopist point of view could lead to base the allocation of emission rights on a more egalitarian reference, for example an allocation of emission rights on the basis of the population of each country. But even the scenarios that combine a decrease in global emissions and a convergence towards a single level of emission per capita worldwide over seventy years impose considerable levels of effort, not only within the United States but also within other countries where industry and transportation should experience significant growth.

An urgent problem must be solved, the integration of developing countries in the Kyoto framework. The solution adopted in the Protocol is the Clean Development Mechanisms (i.e. emission credit for developed countries when they invest in a project that reduces developing countries' emissions). This solution presents some political advantages, but it is economically flawed, being too complex and a potential source of distortions.

The challenge of the integration of developing countries in the Kyoto framework is formidable. A failure to integrate these countries would mean the failure of the whole Kyoto construction. A success would ensure a sustainable agreement. The proposals of this report, in regard to these aspects, are based on two observations. First, it is quite shocking to ask countries with small CO₂ emissions to pay to limit the climate change caused by other countries. Second a significant reduction of emissions is compatible with generous quota rights for developing countries. These countries would therefore adopt less polluting technologies, generating limited costs in these countries, and would act as net suppliers of carbon emission permits on the market. This would result in significant transfers from developed countries, while limiting the adjustment costs for the latter countries. That is, a 'win-win' agreement between developed and developing countries is possible.

To make such an agreement work will nevertheless be difficult. One of the central messages of this report is that it is necessary to present

economically attractive solutions to developing countries in order to make Kyoto sustainable and to be able to go beyond the Protocol. In the short-run, these solutions must be generous enough to make developing countries join the Kyoto framework. This can require allocating non constraining ceilings, or emission quotas higher than the actual emissions for developing countries. However, it is also important to set clear rules for the medium run, so that these incentives become an engine for adopting environmentally friendly strategies in developing countries.

The issue of international governance

Global warming raises a more general issue of international governance. Each country's best interest is not to participate in an agreement if the other countries participate (each country counting on the others to bear the costs of the effort while enjoying the benefits of a public good, the world climate). In addition, providing generous incentives for some countries (e.g. Russia) to participate by allocating permits that exceed their emissions and that they could sell on the market could result in an opportunist behavior. Finally, reducing greenhouse gas emissions involves some costs for polluting industries (carbon taxes or purchase of emission rights), that could create distortions of competition if some countries are not subject to the same discipline.

The Kyoto architecture, with quantity objectives at the international level, does not imply that the national policies implemented to reach the emission targets be based on the same architecture. A domestic price system that could make it possible to reduce emissions can be implemented through a set of taxes that would not handicap domestic products compared to the imported ones. Carbon taxes could be deductible for the share of production that is exported. Implementing such a tax system would nevertheless be complex, especially for the gases other than the CO₂, for which it is hard to tax the emissions 'upstream', e.g. through a tax on fossil fuel, for example. A tax system that would track the emissions and be applied on the final goods would require tracking physical flows, for example involving a system of carbon base accounting.

It appears necessary to consider the effects of a change in international trade rules in order to find a better articulation between market access and climate protection. If it is not possible for a country to discriminate between imports coming from a country that does not comply with an international discipline on a common good (like the climate), the non participating country that does not bear the effort costs will enjoy a extra competitiveness, and a larger market share. This could result in a higher overall emission level worldwide. That is, the presence of common goods provides some arguments for some linkage between trade and environmental negotiations. A change in the World Trade Organization rules would not easy to negotiate, and is unlikely to be accepted by all members. It could perhaps be useful to consider globalizing the negotiations on trade and the negotiations on global

common goods. Economic analysis suggests that expanding the scope of the negotiation could increase the space of mutually beneficial agreements.

Finally, Kyoto must be supplemented by an ambitious effort of technological cooperation at the community level. An ambitious policy of research and development for new technologies as well as for carbon sinks is the only solution to face the challenges in the long run. In this area, it is necessary that the European Union become intellectually more autonomous in terms not only of technology but also in terms of intellectual analysis of the climate policy.

This report by Roger Guesnerie is discussed by Paul Champsaur and Alain Lipetz.

It includes several complements that focus on key issues:

- Philippe Jean-Baptiste, Philippe Ciais, Jean-Claude Duplessy and Jean Jouzel (Institut Pierre-Simon Laplace) explain what is known and what is still uncertain regarding the physical aspects of climate change;
- Philippe Ambrosi and Jean-Charles Hourcade (Centre national de la recherche scientifique), discuss the costs of the damages resulting from climate change;
- Patrick Criqui (Université de Grenoble), Marc Vielle (Commissariat à l'énergie atomique) and Laurent Viguiier (Université de Genève) describe the results of several scenarios on global warming, based on several models, and assess the costs of policies that would reduce greenhouse gas emissions;
- Franck Lecocq (The World Bank) and Jean-Charles Hourcade explain how uncertainty, irreversibility and long term discounting can be taken into account in the economics of global warming;
- Cédric Philibert (International Energy Agency) sheds light on the choice between policy instruments based on prices (taxes) and quantities (permits) and suggests how the Kyoto architecture could be improved;
- Christine Cros (Secrétariat général du Comité interministériel pour les questions de coopération économique européenne) and Sylviane Gastaldo (ministère de l'Écologie et du Développement durable) describe the various market based experiments for regulating emissions and discuss the prospects of tradable permits in the case of global warming;
- Jean-Louis Bal, François Moisan and Alain Morcheoine (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) present a state of the art on the technological solutions for reducing emissions, and substitutes for fossil fuel.

This set of complements to the main report by Roger Guesnerie provides information on several difficult questions raised by climate change.

PREMIER MINISTRE

Conseil d'Analyse Économique

85 boulevard du Montaparnasse 75006 PARIS
Télécopie : 01 53 63 59 50

Site Internet : www.cae.gouv.fr

Cellule permanente

Mario Dehove

Secrétaire général et Président délégué par intérim

01 53 63 59 50

Joël Maurice

Conseiller scientifique

Membre du CAE

Politiques structurelles

Questions européennes

Laurence Bloch

Conseillère scientifique

Commerce extérieur

Questions internationales

Jean-Christophe Bureau

Chargé de Mission

Agriculture

Environnement

Christine Carl

Chargée des publications et de la communication

01 53 63 59 36

christine.carl@cae.pm.gouv.fr

Katherine Beau

Chargée d'études documentaires

01 53 63 59 28

katherine.beau@cae.pm.gouv.fr

