

ODILE BLANCHARD  
PATRICK CRIQUI<sup>1</sup>

# LA VALEUR DU CARBONE : UN CONCEPT GÉNÉRIQUE POUR LES POLITIQUES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

**RÉSUMÉ.** Dans le protocole de Kyoto, les pays industrialisés ont accepté de s'engager de façon contraignante, pour l'horizon 2008-2012, à limiter leurs émissions de gaz à effet de serre. Mais ces pays entendent atteindre leur objectif en limitant les coûts liés aux réductions d'émission. Dans ce contexte de la recherche de politiques coût-efficaces, le concept générique de valeur du carbone constitue un outil sans doute incontournable. La valeur du carbone, définie comme le coût des actions à entreprendre pour ne pas émettre une tonne de carbone, ou encore la faire absorber par un « puits », correspond alors au coût marginal de réduction des émissions.

Cet article s'articule autour de deux objectifs : sur le plan méthodologique, il s'agit d'explorer le concept de valeur du carbone ainsi que ses applications pour l'analyse des enjeux de la négociation internationale ; sur le plan de l'analyse des politiques publiques, il s'agit de mettre en évidence les liens entre les valeurs du carbone, le choix des instruments économiques et la définition des objectifs et politiques sectoriels.

La première partie rappelle tout d'abord en quoi le protocole de Kyoto constitue une

étape très importante dans la négociation internationale : c'est un engagement contraignant pour les pays industrialisés, assorti de « mécanismes de flexibilité » (permis d'émission négociables, actions conjointes) pour atteindre l'objectif de réduction des émissions. Elle montre ensuite les limites de l'analyse coûts-avantages pour guider l'action internationale en matière de lutte contre l'effet de serre et justifie l'approche adoptée, celle de l'analyse coûts-efficacité. Dans ce cadre, le concept générique de valeur du carbone permet à la fois d'appréhender le coût marginal de réduction des émissions de différents pays et d'analyser des « bulles » de pays au sein desquelles il y aurait création d'un marché de permis d'émission. Le volume potentiel d'échanges de permis entre les pays de la bulle dépend alors des écarts entre les coûts marginaux de réduction nationaux hors marché (valeurs nationales du carbone) et le coût marginal de réduction (uniforme) de la bulle prise dans son ensemble (c'est-à-dire la valeur internationale du carbone ou encore le prix du permis d'émission).

La deuxième partie confronte tout d'abord diverses évaluations des valeurs du

1. ODILE BLANCHARD est maître de conférences à l'Université Pierre Mendès-France, Grenoble (odile.blanchard@upmf-grenoble.fr) ; Patrick Criqui est directeur de recherche, Institut d'Économie et de Politique de l'Énergie (IEPE-CNRS), Université Pierre Mendès-France (patrick.criqui@upmf-grenoble.fr).

carbone obtenues par des exercices de modélisation pour différents pays ou régions du monde. Les évaluations sont présentées en premier lieu sans dispositif de flexibilité, puis selon diverses bulles dans lesquelles seraient créés des marchés de permis d'émission. Ces développements confirment et quantifient les avantages économiques d'un marché de permis par rapport à une situation sans échange.

La problématique internationale est ensuite transposée au niveau inter-sectoriel pour un pays. La valeur nationale du carbone peut en effet s'analyser aussi comme la résultante des coûts marginaux des divers secteurs de l'économie, pour un niveau donné de réduction d'émissions. L'étude du cas français fait apparaître des courbes de coûts marginaux de réduction largement différenciées selon les secteurs. Ce résultat permet de souligner les implications sectorielles très différentes selon les réductions assignées à chaque secteur par les pouvoirs publics : dans une politique privilégiant l'efficacité économique (égalisation des coûts marginaux de réduction), les secteurs

électricité et industrie réaliseraient l'essentiel des réductions nécessaires pour respecter l'objectif de Kyoto ; inversement, dans une perspective privilégiant des objectifs sectoriels identiques – basée par exemple sur un taux uniforme de réduction des émissions (0 % dans le cas français) – la stabilisation des émissions au niveau de 1990 mènerait à un coût marginal de réduction très important dans les transports et les services, et à un coût nul pour les secteurs électrique et industriel.

Le concept de valeur du carbone constitue ainsi un outil d'aide à la décision pour les États, tant au niveau des négociations internationales qu'au niveau des stratégies à mener à l'intérieur des pays. Il contribue en particulier à structurer, d'une part les réflexions sur l'arbitrage entre les efforts de réduction à fournir sur le territoire national et le degré de recours au marché international de permis, et d'autre part celles portant sur la répartition inter-sectorielle des réductions à effectuer au plan national.

Classification *JEL* : H39 ; H41 ; Q25 ; Q28 ; Q48.

**L**a limitation des émissions de gaz à effet de serre, et en particulier du CO<sub>2</sub>, est une nécessité reconnue par la communauté internationale, dans un premier temps avec la Convention Cadre sur le Changement Climatique (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 1992), issue elle-même du Sommet de Rio (1992), puis plus récemment et de façon plus contraignante dans le protocole de Kyoto (UNFCCC, 1997). Malgré les incertitudes scientifiques liées aux conséquences de l'effet de serre, cet engagement découle de l'application d'une politique de précaution face au risque global à long terme que constitue le changement climatique d'origine anthropique.

Compte tenu cependant de la tendance quasi-générale à l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> dans les pays de l'OCDE depuis 1990, le respect des engagements pris pour l'horizon 2008-2012 s'avérera probablement difficile. C'est dans ce contexte que le rapport *Énergie 2010-2020* du commissariat général du Plan avait souligné l'intérêt d'afficher en France une « valeur du carbone », plus exactement de la tonne de carbone non émise : « quels que soient les objectifs sectoriels retenus et les instruments mobilisés, l'efficacité de l'action en France pour le respect des engagements internationaux aurait à gagner à ce que soit affichée une valeur du carbone. » (CGP, 1998, p. 219). L'intérêt de ce concept vaut pour tous les pays : permettant d'associer une valeur quantifiée au Principe de Précaution en

matière climatique, il peut en particulier aider à construire l'efficacité des choix d'investissements en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

L'objectif de cet article est d'explorer ce concept de valeur du carbone et de montrer l'intérêt qu'il y aurait à identifier une valeur du carbone tant au niveau des négociations internationales qu'au niveau des stratégies à mener à l'intérieur de chaque État<sup>2</sup>. La première partie, méthodologique, présente le concept de valeur du carbone et ses applications pour l'analyse des termes de la négociation internationale. La deuxième partie présente les estimations des valeurs du carbone issues de diverses études modélisées et met en évidence les enjeux internationaux et nationaux qui en découlent.

## D e l'accord de Kyoto au concept de « valeur du carbone »

### Les principales étapes du processus de négociation internationale

Adopté en décembre 1997 à l'issue de la troisième « Conférence des Parties<sup>3</sup> » (COP-3), le protocole de Kyoto marque une étape très importante dans la négociation sur les mesures d'atténuation du changement climatique, et ce au moins à deux niveaux :

- d'une part, il constitue le premier engagement quantitatif contraignant pris par les pays industrialisés à limiter leurs émissions de gaz à effet de serre ;
- d'autre part, il reconnaît la possibilité d'avoir recours à certains dispositifs de flexibilité pour atteindre les objectifs fixés.

En ce qui concerne le premier point, trente-neuf pays se sont engagés à réduire ou à limiter leurs émissions de six gaz à effet de serre pour une période budgétaire allant de 2008 à 2012 et ces objectifs sont exprimés en pourcentage des émissions constatées en 1990 (ou 1995 selon les gaz<sup>4</sup>). Ces pays dits « de l'Annexe B »<sup>5</sup> sont, à quelques rares exceptions près, les pays membres de l'OCDE en 1992 et les pays dits « en transition ». Globalement, ils doivent réduire leurs émissions d'un peu plus de 5 % par rapport à 1990, mais les engagements sont différenciés d'un pays à l'autre : l'Union européenne a accepté de réduire globalement ses émissions de 8 %, les États-Unis de 7 %, le Japon et le Canada de 6 %, tandis que certains pays (Norvège, Fédération de Russie, Ukraine) ont obtenu de limiter leurs émissions au niveau de 1990 et d'autres encore d'augmenter leurs émissions (Australie, + 8 % ; Irlande, + 10 %). Le protocole n'inclut pas d'objectifs chiffrés de limitation des émissions de la part des pays en développement à l'horizon 2008-2012.

2. Cet article est issu d'une recherche sur la valeur du carbone effectuée pour le commissariat général du Plan (Blanchard & Criqui, 1999) et d'un contrat sur les applications du modèle POLES pour le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

3. La Conférence des Parties réunit annuellement, depuis 1995, les « Parties » signataires de la Convention Cadre sur le Changement Climatique.

4. 1990 pour le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) ; 1995 pour les hydrofluorocarbones (HFC), hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>).

5. Car ils sont répertoriés à l'Annexe B du protocole.

Au sein de l'Union européenne, la répartition des efforts a été définie en juin 1998 : l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Italie ont accepté des réductions respectives de 21 %, 12,5 % et 6,5 % ; la France doit stabiliser ses émissions au niveau de 1990 ; le Portugal, la Grèce, l'Espagne doivent limiter l'augmentation de leurs émissions respectivement à 27 %, 25 % et 15 %,...

Avec ces objectifs quantitatifs différenciés de réduction, le protocole de Kyoto établit en fait une répartition initiale des droits à polluer entre pays de l'Annexe B. Mais il ne prévoit initialement aucune sanction à l'encontre des pays qui ne respecteraient pas leurs engagements. Un groupe de travail sur les règles « d'observance » a été constitué postérieurement au protocole de Kyoto et doit poursuivre ses travaux pour la sixième Conférence des Parties (COP-6) en 2000.

En contrepartie de leur engagement contraignant, les pays industrialisés, et en particulier les États-Unis, ont obtenu que soient prévus, dans le protocole, des dispositifs de « flexibilité géographique ». Ceux-ci, en sus d'efforts réalisés sur le territoire national – c'est le concept de « supplémentarité » –, permettraient aux pays d'atteindre leur objectif à moindre coût. Ils incluent, d'une part, l'échange de droits d'émission au sein d'un marché limité à l'Annexe B et, d'autre part, les actions mises en œuvre conjointement.

Le système d'échange de droits (ou de permis) d'émission permet à un pays présentant des coûts élevés de réduction des émissions d'atteindre son objectif en achetant des droits à un autre pays qui lui, aura dépassé son objectif (du fait de coûts de réduction inférieurs au prix du permis). Mais les modalités pratiques de mise en place du marché de droits d'émission ne sont pas précisées dans le protocole et n'ont toujours pas été abordées véritablement dans les Conférences des Parties qui ont suivi celle de Kyoto (COP-4 à Buenos Aires en 1998, COP-5 à Bonn en 1999). Compte tenu des difficultés prévisibles pour obtenir un consensus des pays afin de définir ces modalités, l'instauration réelle d'un tel marché reste encore problématique.

Les actions mises en œuvre conjointement donnent la possibilité à tout pays d'acquérir des crédits de réduction d'émission pour des projets (microéconomiques) réalisés dans un autre pays. Ces crédits de réduction d'émission portent sur les réductions effectuées de façon additionnelle par rapport à celles « qui pourraient être obtenues autrement ». Le protocole de Kyoto prévoit deux mécanismes d'action conjointe :

— « l'Application Conjointe » (Activities Implemented Jointly), qui permet de fournir des unités de réduction d'émissions à un pays de l'Annexe B, en échange du financement par une entité de ce pays, de projets de réduction effectués dans un autre pays de l'Annexe B ;

— le « Mécanisme de Développement Propre » (MDP) (Clean Development Mechanism), qui permet de fournir, sur une base multilatérale, des certificats de réduction d'émissions pour des projets de réduction d'émissions effectués dans les pays en développement ; ces certificats peuvent être utilisés par les pays de l'Annexe B « pour remplir une partie de leurs engagements »<sup>6</sup>.

Les projets d'action conjointe engagés à l'heure actuelle s'inscrivent dans une phase-pilote durant laquelle les pays ne bénéficient pas d'unités de réduction

6. Outre la contribution qu'il apporte à la limitation des émissions, le MDP a simultanément pour objectif de parvenir à un développement durable des pays ne faisant pas partie de l'Annexe B (article 12 du protocole de Kyoto).

d'émissions pour les réductions additionnelles accomplies<sup>7</sup>. La cinquième Conférence des Parties (Bonn, 1999) a prorogé cette phase-pilote au-delà de 2000. Cependant, à terme, si le marché de permis d'émission voit le jour et si l'action conjointe est mise en place officiellement, des unités de réduction d'émissions pourraient être échangées sur ce marché.

On notera que l'existence de la « bulle européenne » dans le protocole de Kyoto<sup>8</sup> est souvent perçue, par les pays de l'Annexe B hors Union européenne, comme un quatrième mécanisme de flexibilité. En effet, l'objectif unique de réduction des émissions fixé dans le protocole de Kyoto pour l'Union européenne (- 8 %) a permis ensuite aux pays européens d'obtenir une large différenciation de leurs objectifs en fonction de leur situation nationale.

### Les politiques de réduction des émissions, de l'analyse coûts-avantages à l'analyse coûts-efficacité

En adoptant le protocole de Kyoto, les pays de l'Annexe B se sont donc engagés sur des quantités d'émissions de gaz à effet de serre à respecter à l'horizon 2008-2012, dans une logique relevant de l'application du Principe de Précaution (Hourcade, 1997). Mais il est évident aussi que ces pays entendent atteindre leur objectif au moindre coût, comme cela avait déjà été clairement affiché dans la Convention Cadre (UNFCCC, 1992, article 3.3). L'analyse qu'il convient de mener s'inscrit donc dans une perspective coûts-efficacité (ACE), où il s'agit de minimiser les coûts des mesures permettant d'atteindre un objectif donné de réduction des émissions. Ces coûts traduisent l'effort que la société est prête à consentir pour ne pas dépasser un niveau d'émission (de précaution) permettant de limiter les impacts potentiels de la concentration croissante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (GRAPHIQUE 1).

Du point de vue de la théorie économique, c'est sans doute l'analyse coûts-avantages (ACA) qui devrait guider l'action internationale. De manière générale, cette approche a pour but de recenser tous les effets (négatifs et positifs) d'une action ou d'un projet sur le bien-être, puis de les évaluer en termes monétaires actualisés. L'objectif des actions de dépollution est en effet de maximiser le bénéfice net tiré des actions engagées. L'optimum de dépollution serait ainsi déterminé par le point assurant l'égalisation du coût marginal et du gain marginal de la réduction des émissions, ce dernier correspondant en fait au coût marginal des dommages évités (Nordhaus, 1991). De manière alternative, le coût marginal des dommages évités pourrait aussi être approché par le coût marginal de la protection vis-à-vis du changement climatique, en général inférieur car ne conduisant pas au contrôle de toutes les externalités (GRAPHIQUE 1).

7. Exemples de projets d'action conjointe de la phase-pilote :

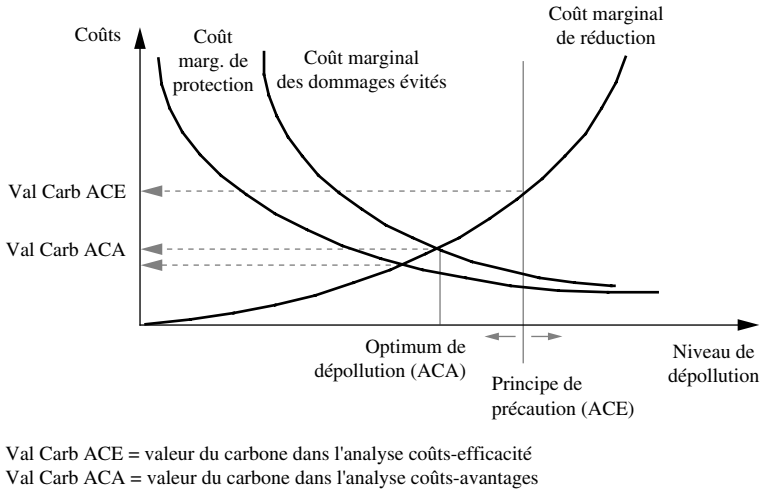
— le projet « Coal to gas conversion » en Pologne (financement partiel par l'État norvégien),  
— le projet de foresterie CARFIX, pour la fixation et la séquestration de carbone au Costa Rica (financement partiel par des compagnies électriques des États-Unis).

Pour plus d'informations, voir Cornut & Menanteau (1997) et Cornut (1998), ou <http://www.unfccc.de/program/aij/aij-proj.html>.

8. Une « bulle » est un ensemble de pays devant respecter collectivement un objectif quantitatif d'émissions et susceptibles d'échanger entre eux des permis d'émission.

GRAPHIQUE 1

## De l'optimum de dépollution à l'application du Principe de Précaution



Dans le cadre de la problématique du changement climatique, l'analyse coûts-avantages présente cependant des limites intrinsèques, principalement en raison de la difficulté à estimer monétairement les avantages (qui proviennent des dommages nets évités par les mesures d'atténuation et de leurs avantages secondaires)<sup>9</sup> et en raison de la polémique sur le taux d'actualisation à retenir.

### LES DIFFICULTÉS D'UNE ÉVALUATION MONÉTAIRE DES DOMMAGES

L'évaluation des dommages s'avère délicate, voire hautement conjecturale, en raison, d'une part des incertitudes liées au changement climatique et, d'autre part de l'absence de méthode homogène et éthiquement acceptable pour exprimer les impacts non marchands du changement climatique en termes monétaires.

Tout d'abord, le recensement des dommages physiques potentiels associés au changement climatique reste dépendant d'incertitudes scientifiques considérables (IPCC, 1996). Ensuite, l'évaluation monétaire de ces dommages pose de nombreuses difficultés. D'une part, bien que les impacts marchands sur certains secteurs économiques soient valorisables, puisque créés dans la sphère marchande, leur valeur dépend de leur mesure physique, qui elle-même renvoie aux incertitudes scientifiques signalées précédemment. D'autre part, les incidences non marchandes du changement climatique (dégradation de la santé,

9. Les dommages « nets » correspondent aux dommages engendrés par le changement climatique, diminués des effets bénéfiques potentiels du changement climatique (y compris l'adaptation au changement climatique). Les avantages secondaires incluent par exemple les réductions d'émissions d'autres gaz polluants (tels que le SO<sub>2</sub>) qui résultent de la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

risque accru de mortalité, détérioration des écosystèmes, disparition de territoires et déplacements de populations,...) sont difficiles à valoriser monétairement, tant d'un point de vue méthodologique qu'éthique, alors même que dans les études disponibles, elles constituent une part dominante du coût social du changement climatique.

En particulier, une des conséquences possibles du changement climatique serait l'augmentation de la morbidité et de la mortalité dans certaines régions. La valorisation économique de cet impact devrait alors s'appuyer sur le calcul de la valeur économique des maladies et des décès supplémentaires dus au changement climatique. Outre l'incertitude déjà mentionnée sur l'ampleur de l'impact, se pose alors la question centrale de la valeur à attribuer à la vie humaine.

La valeur statistique obtenue pour une vie humaine diffère selon l'approche retenue. L'approche descriptive, qui met en évidence le consentement à payer des individus pour éviter le risque de décès ou leur consentement à recevoir pour accepter ce risque, aboutit à une valeur corrélée positivement au niveau du revenu par habitant. Dans l'approche normative, la valeur statistique de la vie humaine repose sur des considérations éthiques ou politiques : toutes les vies épargnées grâce à l'atténuation du changement climatique devraient avoir la même valeur statistique, quel que soit le pays.

L'évaluation des dommages qui en découle diffère considérablement. La question méthodologique du choix de l'approche renvoie évidemment à une question éthique fondamentale : peut-on accepter que la vie d'un habitant des États-Unis ait une valeur statistique dix ou vingt fois supérieure à celle d'un Indien ?

La publication, dans le deuxième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat [GIEC] (IPCC, 1996) d'estimations des dommages dus au changement climatique, puis d'études incluant des valeurs statistiques de la vie humaine basées sur l'approche descriptive, a naturellement suscité une vive polémique au sein des experts du GIEC (Hourcade 1996, p. 66-67 ; Portney, 1998, p. 122 ; Mendelsohn, 1998, p. 225-226). Il en est résulté que le résumé officiel de ce rapport et le résumé à l'intention des décideurs sont très élusifs sur cette question et passent finalement sous silence toute estimation chiffrée des dommages (GIEC, 1996 *a* et *b*).

## LE CHOIX DU TAUX D'ACTUALISATION

L'utilisation de l'analyse coûts-avantages dans le cadre du changement climatique est également rendue délicate par la question des arbitrages inter-temporels : du fait que les gaz à effet de serre sont des « polluants stocks » dont la durée de vie dans l'atmosphère est très longue, le changement climatique annoncé s'étendrait sur plusieurs siècles. Ainsi, alors que certains coûts liés aux mesures d'atténuation du changement climatique seraient engagés dans un futur proche, les bénéfices tirés de cette mesure ne pourraient être enregistrés que des décennies, voire des siècles plus tard.

Le choix du taux d'actualisation est évidemment primordial dans ce contexte inter-temporel. Si le taux est élevé, la valeur actuelle nette des bénéfices des générations futures est très faible et celle des coûts d'atténuation engagés par la génération présente est comparativement importante : à la limite, l'inaction est la décision à préconiser dans ce cas. Et inversement : avec un taux d'actualisation

très faible ou nul, les bénéfices cumulés sur plusieurs générations, qui proviendraient des actions d'atténuation de l'effet de serre entreprises par la génération actuelle, dépasseraient probablement très largement les coûts engagés et imposeraient des actions immédiates de grande ampleur.

Deux grandes catégories conceptuelles différentes permettent de fonder la détermination du taux d'actualisation de projets d'investissements publics. La première s'attache au rendement des investissements privés et fait apparaître un coût d'opportunité du capital. La deuxième catégorie s'appuie plutôt sur des considérations éthiques et définit un taux en fonction de la valorisation de l'avenir (Arrow, 1995).

Les niveaux des taux qui sont associés à ces deux approches conceptuelles divergent sensiblement : élevés dans le premier cas (8 à 10 %) (Birdsall & *al.*, 1993), ils sont plus faibles dans le second (1 à 5 %) (Nordhaus, 1990 ; Cline, 1992 ; Arrow, 1995). Mais, selon les termes même du GIEC « la meilleure façon de choisir un taux d'actualisation est et restera sans doute une question insoluble » (GIEC, 1996a, p. 79).

## DES ÉCARTS CONSIDÉRABLES DANS LES ÉVALUATIONS CHIFFRÉES DES DOMMAGES

Compte tenu des larges incertitudes soulignées précédemment, les évaluations récentes des dommages établissent le coût des dommages annuels à quelques points de pourcentage du PIB, pour un doublement de la concentration de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>. Mais le coût serait proportionnellement beaucoup plus élevé pour les pays en développement (jusqu'à près de 9 %) que pour les pays industrialisés (de l'ordre de 1 à 3 %) (IPCC, 1996, p. 205). Il le serait encore plus dans une perspective normative de la valeur statistique de la vie humaine, ce qui modifierait probablement profondément les résultats.

Quant aux coûts marginaux actualisés des dommages cumulés associés aux émissions de CO<sub>2</sub> d'une décennie (le plus souvent 2001-2010), ils sont estimés entre 5 et 170 dollars de 1990 par tonne de carbone à l'horizon 2100, selon les études (IPCC, 1996, p. 215 ; Eyre & *al.*, 1998). La sensibilité au taux d'actualisation est, comme nous l'avons souligné, très forte, tout comme la sensibilité à l'hypothèse retenue pour la valeur statistique de la vie humaine.

Étant donné ces difficultés méthodologiques et les incertitudes qui subsistent tant sur l'évolution du climat que sur les coûts des dommages liés au changement climatique, il n'est pas étonnant que l'approche coûts-avantages ait cédé le pas à l'approche coûts-efficacité dans les négociations internationales, et en particulier dans le protocole de Kyoto. L'approche coûts-avantages pourrait finalement permettre avant tout d'informer la négociation internationale en amont, par l'analyse des stratégies de contrôle du changement climatique sur le très long terme. En revanche, l'approche coûts-efficacité peut être appliquée en aval de la fixation des objectifs au plan international : à un objectif de réduction des émissions fixé au plan de la décision politique peut alors être associée, par des études économiques sur les coûts de réduction correspondants, une ou des « valeur(s) du carbone ».



## Le concept de valeur du carbone dans l'approche coûts-efficacité

Les mesures d'atténuation du changement climatique consistent principalement à réduire les émissions de gaz à effet de serre ou à capter ces émissions dans des « puits » de carbone. Dans ce cadre, la valeur du carbone peut être définie comme le coût des actions visant à l'atténuation de l'effet de serre et permettant de ne pas émettre dans l'atmosphère une tonne de carbone ou encore de la faire absorber par des puits. Cette valeur du carbone peut avoir une signification à la fois au plan national et au plan international, et son utilisation concomitante à ces deux niveaux soulève évidemment une série de questions que nous analyserons plus loin.

Dans l'approche coûts-efficacité, la valeur du carbone correspond au coût marginal de dépollution (GRAPHIQUE 1). En premier lieu, elle dépend donc du niveau de dépollution retenu comme objectif. Mais le niveau de dépollution qui respecte le Principe de Précaution reste objet de polémiques au sein de la communauté scientifique. En d'autres termes, quelle concentration atmosphérique des gaz à effet de serre doit-on retenir dans une perspective d'application du Principe de Précaution ? L'article 2 de la Convention Cadre sur le Changement Climatique propose, en termes prudents, 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 », mais il ne fixe pas ce niveau. Les travaux du GIEC mettent en évidence les niveaux d'émissions des différents gaz à effet de serre qu'il faudrait respecter pour atteindre des niveaux donnés de concentration de ces gaz dans l'atmosphère dans les siècles à venir. Mais ils se refusent à formuler des recommandations sur un niveau de stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre (GIEC, 1996b, p. 102-106).

De plus, même si un objectif global de dépollution est fixé, se pose encore la question de la répartition de l'effort de dépollution entre les différents pays. Une répartition efficace économiquement supposerait l'égalisation des coûts marginaux de réduction dans les différents pays mais ne répondrait pas à un souci d'équité, si ce n'est au principe de justice strictement fondé sur des principes utilitaristes. Par ailleurs, définir une répartition équitable de l'effort entre les pays s'avère largement impossible, compte tenu des multiples principes d'équité qui peuvent être invoqués par les pays et qui conduisent à des règles divergentes de différenciation des objectifs. Tout au plus pourrait être élaborée une répartition acceptable aux yeux des pays, qui risque cependant de ne pas être la plus efficace économiquement (Godard, 1999 ; Blanchard & *al.*, 1998).

Malgré ces interrogations, nous nous attacherons ci-dessous à présenter la méthode d'évaluation de la valeur du carbone avant de montrer les applications possibles de ce concept.

### LES MÉTHODES D'ÉVALUATION DE LA VALEUR DU CARBONE

Comme nous l'avons déjà souligné, la révélation d'une valeur du carbone dans l'approche coûts-efficacité passe par la détermination du coût marginal de dépollution lié à un objectif donné. Par le terme de dépollution, nous entendons ici les actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre, dont les coûts peuvent être révélés par des méthodes quantitatives homogènes. L'approche descendante (*top-down*) s'appuie sur des modèles macroéconomiques, le plus souvent d'équi-

libre général. L'approche ascendante (*bottom-up* ou sectorielle) relève d'une « approche d'ingénieur » ou est menée avec des modèles d'optimisation et de simulation du système énergétique. Cependant, compte tenu des différences d'architecture et d'objectifs de ces deux familles de modèles – d'équilibre général et sectoriel – les valeurs du carbone calculées à partir de ces modèles ne reflètent pas les mêmes coûts. Dans les modèles descendants, le coût marginal de réduction des émissions est un coût macroéconomique : il correspond au coût marginal des ressources de l'ensemble de l'économie qui doivent être engagées pour diminuer les émissions d'une tonne de carbone supplémentaire. Dans les modèles énergétiques, le coût marginal de réduction est le coût pour le secteur étudié (fréquemment appelé « coût direct » ou « coût brut »).

Quel que soit le type de modèles considéré, il s'avère que les modèles basés sur l'approche coûts-efficacité procèdent de façon similaire pour évaluer la valeur du carbone. La méthode est présentée à partir des travaux menés avec le modèle POLES de l'IEPE (ENCADRÉ 1 et GRAPHIQUE 2).

#### ENCADRÉ 1

##### Le modèle POLES

Le modèle POLES est un modèle de simulation du système énergétique mondial à l'horizon 2030 : les évolutions démographiques et économiques, pour chacun des grands pays ou régions du monde, sont considérées comme exogènes ; en revanche, les évolutions de l'ensemble des variables caractérisant la consommation, la transformation, la production et les prix de l'énergie sont endogènes au modèle (Criqui & al., 1996).

Ses principales utilisations relèvent de trois grands types d'exercices :

1. Prospective détaillée du système énergétique mondial, par grand pays ou région, avec simulation de la demande par secteur, des technologies énergies nouvelles et renouvelables, des systèmes électriques, de l'offre et des prix des hydrocarbures.

2. Analyse du progrès technique du secteur de l'énergie soit avec simulation de scénarios exogènes de « percée technologique », soit par une endogénéisation des effets cumulatifs d'expérience et d'apprentissage sur les nouvelles technologies.

3. Simulation des impacts potentiels de la prise en compte des contraintes d'environnement global, exprimées dans les accords internationaux sur la limitation des gaz à effet de serre, avec calcul des Coûts Marginaux de Réduction par pays et par secteur et utilisation du logiciel spécialisé ASPEN (Analyse des Systèmes de Permis d'Émission Négociables) pour la simulation de « marchés de droits d'émission », éventuellement régulés.

C'est un modèle de simulation récursive : la dynamique est donnée, à partir du point initial, puis d'année en année, par les ajustements progressifs des variables d'offre et de demande d'une part et de prix d'autre part. L'horizon prospectif a été volontairement limité à une trentaine d'années, dans le souci de conserver dans le modèle des technologies « explicites » et non « génériques » : l'hypothèse est faite que les technologies qui pourront avoir un impact quantitatif significatif en 2030 doivent être au moins identifiées aujourd'hui.

Le modèle est construit selon une structure hiérarchisée de modules, interconnectés au niveau national, régional et mondial :

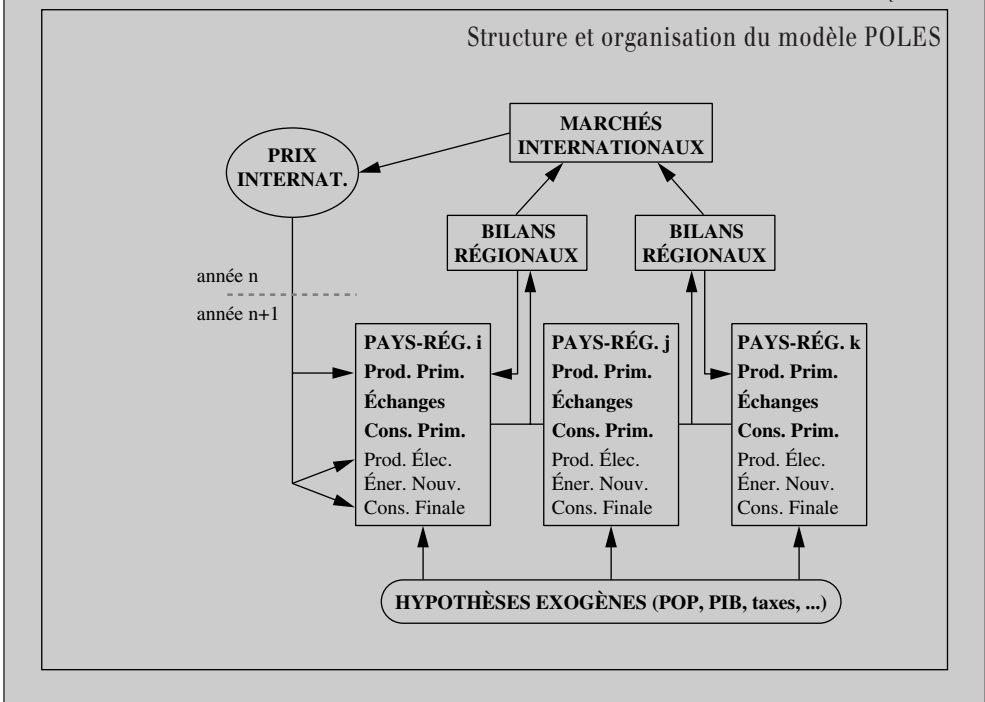
— le plan national intègre les modules de production d'énergies fossiles, de conversion en électricité, d'énergies nouvelles et de consommation par secteurs (10 secteurs pour les pays à modèle détaillé) ;

— les plans régionaux ou mondiaux intègrent les flux d'échanges énergétiques et les modules de prix internationaux, pour les trois grandes énergies faisant l'objet d'un large commerce international, pétrole, gaz naturel et charbon.

Dans sa désagrégation géographique actuelle, le modèle distingue 30 pays ou régions qui permettent de reconstituer divers schémas régionaux et en particulier celui en 11 régions, utilisé dans la plupart des études énergétiques mondiales (WEC-IIASA, 1995 ; IEA, 1996 ; EIA, 1997) : Amérique du Nord, Amérique latine, Europe de l'Ouest, Europe centrale, CEI, Afrique du Nord et Moyen-Orient, Afrique Sub-saharienne, Asie du Sud, Asie du Sud-Est, Asie continentale, Pacifique OCDE.

Par ailleurs, au sein de chaque région, les plus grands pays – ceux du G7 et les cinq grandes économies en développement rapide Chine, Inde, Corée du Sud, Brésil et Mexique – sont identifiés et traités par des modèles détaillés. Cette caractéristique est particulièrement importante pour l'étude des coûts des stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que des enjeux associés dans la négociation internationale sur le changement climatique.

GRAPHIQUE 2



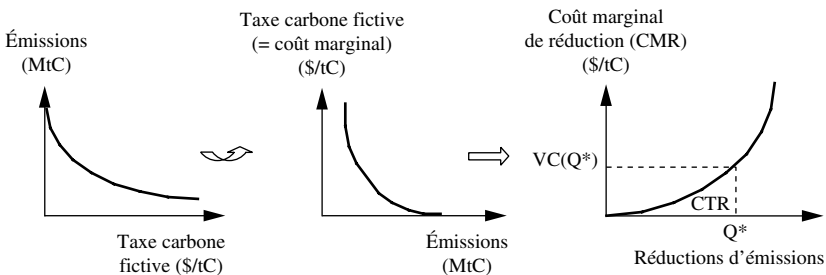
Dans le modèles POLES, l'évaluation des coûts de réduction est menée à partir de l'introduction d'une « taxe carbone fictive » (reflétant la valeur du carbone) dans l'ensemble des modules de consommation et transformation de l'énergie. Cette taxe carbone fictive entraîne, dans le modèle, des ajustements de la demande d'énergie finale, par des changements technologiques ou de comportements implicites, ainsi que des substitutions dans les systèmes de conversion

d'énergie, pour lesquels les technologies sont explicitées. À partir d'une projection de référence dans laquelle la taxe carbone fictive est considérée égale à zéro, il est ensuite possible de calculer, par simulations successives, les niveaux d'émission associés à une taxe fictive (valeur du carbone) variant pas à pas, de 0 à 600 dollars/tC par exemple.

On peut alors tracer des courbes d'émissions en fonction de la valeur du carbone, ou, par inversion des axes, des courbes de coûts marginaux en fonction du niveau des émissions. On en déduit directement des courbes de coûts marginaux de réduction (CMR) en fonction des réductions d'émissions effectuées par rapport à la référence (Criqui & *al.*, 1997). Pour un objectif de réduction déterminé  $Q^*$ , la valeur du carbone  $VC(Q^*)$  est le coût marginal de réduction correspondant, c'est évidemment le coût du dernier type d'action à entreprendre pour respecter l'objectif. Le coût total de réduction (CTR) des émissions est alors déterminé par l'aire (l'intégrale) sous la courbe de coût marginal de réduction jusqu'à  $Q^*$  (GRAPHIQUE 3).

GRAPHIQUE 3

## Construction de la courbe de coût marginal de réduction



La distinction entre coût marginal de réduction et coût total de réduction est très importante. Il convient de ne pas conclure systématiquement à un coût total faible dès lors que le coût marginal est faible ou inversement, à un coût total élevé du fait d'un coût marginal élevé : tout dépend en effet du volume de réductions et de la pente de la courbe de coût marginal.

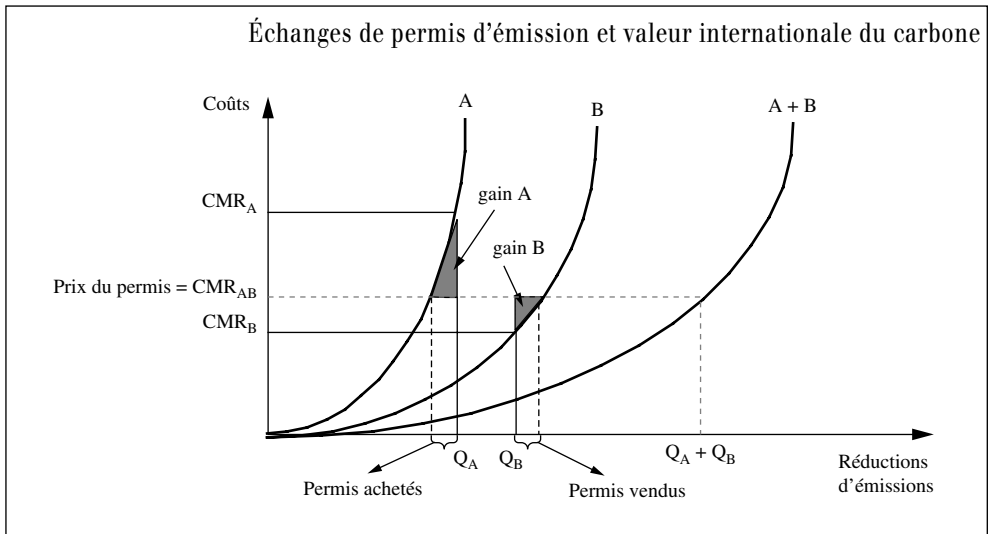
### L'UTILISATION DE LA VALEUR DU CARBONE POUR L'ANALYSE DES MARCHÉS DE PERMIS D'ÉMISSION

Les courbes de coût marginal de réduction peuvent être étudiées pour chaque région prise isolément, mais aussi pour une région consolidée (ou une « bulle ») : le principe de base est alors que, pour une valeur du carbone donnée, les réductions d'émission d'une région A et d'une région B sont additives pour calculer les réductions de la région consolidée A + B. Consécutivement, les courbes de coût marginal de réduction le sont aussi.

Cette propriété ouvre la voie à l'analyse de bulles ou de marchés, au sein desquels il y aurait une égalisation des coûts marginaux de réduction, et donc minimisation du coût total, par échange de permis d'émission notamment. Le GRAPHIQUE 4 décrit le mécanisme d'échange de droits d'émission entre deux pays A et B soumis à des contraintes d'émission respectives  $Q_A$  et  $Q_B$  (par exemple, deux pays de l'Annexe B du protocole de Kyoto, hors pays en transition).

Le coût marginal de réduction pour la zone consolidée  $CMR_{AB}$  (qui correspond à la fois à la valeur internationale du carbone et à la valeur des permis d'émission) s'établit par construction à un niveau intermédiaire entre les coûts marginaux des deux pays pris séparément,  $CMR_A$  et  $CMR_B$ . Le volume des échanges de permis découle des écarts entre les coûts marginaux de réduction nationaux et le coût marginal de réduction de la bulle (qui détermine le prix du permis). La valeur des échanges est constituée par le produit du nombre de permis par le prix unitaire des permis (achats pour A, ventes pour B). Les gains de chaque partenaire dans l'échange sont constitués par la différence entre le coût total sans permis et le coût des réductions internes plus les achats (pays A) ou moins les ventes (pays B).

GRAPHIQUE 4



Cette représentation permet également d'étudier la situation d'échange entre un pays contraint A et un pays présentant un excédent de droits d'émission (de l'« air chaud » dans le langage de la négociation pour caractériser la situation des pays en transition<sup>10</sup>) : dans les faits, l'objectif de réduction consolidé serait alors

10. La Russie et l'Ukraine, notamment, se sont engagées dans le protocole de Kyoto à stabiliser, en 2008-2012, leurs émissions au niveau de l'année de référence. Mais la situation économique défavorable depuis 1990 conduit à projeter que les émissions de gaz à effet de serre seront inférieures dans tous les cas à celles de 1990, sans qu'aucune action de réduction d'émissions ne soit nécessaire. « L'air chaud » correspond aux réductions d'émissions obtenues du seul fait de la situation de crise économique.

réduit de la quantité d'air chaud avec même, dans des cas extrêmes, la possibilité d'un respect formel des objectifs sans aucune réduction effective, si l'air chaud est supérieur à la réduction imposée au pays A.

Enfin, il est aussi possible de décrire l'échange entre un pays de l'Annexe B contraint de limiter ses émissions conformément au protocole de Kyoto, et un pays dont les droits d'émission seraient égaux à la projection de référence de ses émissions. Ce dernier cas correspond potentiellement à celui des pays non inclus dans l'Annexe B<sup>11</sup>, dont les émissions ne sont pas contraintes dans le protocole de Kyoto et pour lesquels les travaux de modélisation (POLES, EPPA, SGM, MRT) retiennent le plus souvent une hypothèse d'allocation de droits d'émission correspondant à leur projection de référence (Blanchard & *al.*, 1998 ; Ellerman & *al.*, 1998 ; Edmonds & *al.*, 1998 ; Bernstein & *al.*, 1999). Dans cette hypothèse, si le pays non Annexe B effectuait des réductions au-delà de sa « dotation carbone », il pourrait vendre ces unités de réduction supplémentaires<sup>12</sup>. Le prix du permis correspondrait alors au coût marginal de réduction de la bulle pour la seule quantité de réduction du pays Annexe B.

Les valeurs du carbone obtenues par différentes équipes de modélisation, en fonction de diverses hypothèses de configurations du marché de permis sont présentées *infra*.

## LES INCERTITUDES SUR LA VALEUR INTERNATIONALE DU CARBONE

Diverses incertitudes peuvent entacher les résultats obtenus. Ceux-ci dépendent en particulier des courbes de coûts marginaux construites, de l'articulation des dispositifs de flexibilité prévus dans le protocole de Kyoto, du degré de réalisation des potentiels de flexibilité, et aussi de l'efficacité des « règles d'observance » dont les modalités doivent être précisées à la prochaine Conférence des Parties (COP6, La Haye, novembre 2000). Dans la troisième configuration envisagée précédemment (marché mondial des permis d'émission), vient s'ajouter un autre élément déterminant pour les résultats : l'hypothèse concernant l'attribution des droits des pays en développement en 2010. Celle-ci est pour l'heure une conjecture, mais elle reste fidèle, comme nous l'avons noté, à l'esprit de Kyoto. Dans le futur, toute dotation de droits d'émission pour les pays en développement devra évidemment répondre à des critères minimum d'équité internationale.

De fait, à plus longue échéance, c'est-à-dire au-delà de la période 2008-2012 couverte par le protocole de Kyoto, le montant total des émissions et la répartition des droits entre tous les pays constituent les deux incertitudes majeures pour l'évaluation de la valeur internationale du carbone. Le dilemme équité-efficacité sera donc à nouveau au centre des débats.

## L'ARTICULATION VALEUR INTERNATIONALE-VALEUR NATIONALE DU CARBONE

Des réflexions similaires à celles portant sur la valeur internationale du carbone peuvent être menées sur la valeur nationale du carbone. En l'absence de dis-

11. Pays en développement dans leur grande majorité.

12. Ou encore les faire valider dans le cadre du « Mécanisme de Développement Propre ».

positifs de flexibilité, la valeur nationale du carbone représente en théorie le coût marginal du respect des objectifs nationaux. Mais elle doit aussi être articulée avec les objectifs sectoriels de réduction des émissions, et se trouve alors au centre des problèmes d'élaboration des politiques nationales, à l'instar de la valeur internationale du carbone qui dépend de la répartition des objectifs de réduction entre États et du degré de flexibilité accepté (voir *infra*).

Dans l'hypothèse où les dispositifs de flexibilité prévus dans le protocole de Kyoto fonctionneraient parfaitement, la valeur nationale du carbone devrait être identique à la valeur internationale du carbone, puisqu'il y a égalisation des coûts marginaux de réduction des différents pays participant à l'échange (valeurs nationales du carbone) soit au niveau du prix du permis, soit encore au niveau de la valeur internationale du carbone.

En revanche, l'introduction de plafonds aux échanges internationaux entraînerait la dissociation des valeurs nationales et de la valeur internationale du carbone : d'un côté, du fait de réductions à opérer sur le territoire national supérieures à celles qui résulteraient de l'existence d'un marché parfait, le coût marginal des réductions à opérer nationalement serait supérieur à celui qui découlerait d'un marché parfait ; de l'autre, la valeur internationale du carbone diminuerait, en raison d'une demande internationale plus faible pour les permis (Criqui & *al.*, 1999). Une telle hypothèse correspond à la proposition du Conseil des ministres européens de l'Environnement de fixer des plafonds aux échanges intra-Union européenne (*concrete ceilings*) (Union européenne, 1999). Les pays de l'Annexe B seraient alors contraints d'effectuer un pourcentage minimum de leurs réductions sur leur territoire et les échanges ne viendraient qu'en supplément de ces réductions.

Les valeurs nationales du carbone pourraient également être dissociées de la valeur internationale du carbone si, au niveau d'un pays, certains secteurs pouvaient avoir accès au marché international de permis, tandis que d'autres secteurs seraient soumis aux régulations nationales. La proposition européenne de créer un marché de permis pour les seules entreprises industrielles et énergétiques s'inscrit dans ce cadre (Commission européenne, 2000).

Tel que présenté ci-dessus, le concept de valeur du carbone constitue néanmoins un concept générique, dépendant des objectifs et du degré de flexibilité admis, mais largement indépendant du choix des modalités de réduction des émissions, et en particulier du choix des instruments économiques à mettre en place dans chaque pays pour atteindre l'objectif de réduction fixé, qu'il s'agisse de taxes, de permis d'émission ou même de normes techniques.

## **L** a valeur du carbone : quantifications et implications pour les décisions publiques

De nombreux modèles permettent de projeter les émissions de gaz à effet de serre à divers horizons temporels. À partir de ces émissions, ils déterminent généralement des courbes de coûts marginaux de réduction et des valeurs du carbone, en fonction du montant des réductions à effectuer.

Les modèles que nous avons étudiés sont soit des modèles macroéconomiques d'équilibre général appliqué (MEGA), soit des modèles énergétiques. Il convient de rappeler que les valeurs du carbone calculées à partir de ces modèles ne reflètent pas exactement les mêmes coûts : les coûts obtenus par les modèles macroéconomiques sont des coûts globaux ou « coûts nets », alors que dans les modèles énergétiques, il s'agit de coûts sectoriels, ou « coûts bruts ».

Dans cette partie, nous procédons en deux étapes. Nous comparons tout d'abord diverses évaluations des valeurs du carbone obtenues par des exercices de modélisation pour différents pays ou régions du monde<sup>13</sup>. Puis, sur la base des valeurs du carbone révélées par le modèle POLES pour les différents secteurs de l'économie française, nous montrons que la problématique « équité – efficacité » qui apparaît au plan international peut également être transposée au plan intersectoriel, à l'intérieur d'un même pays.

Les évaluations de la valeur du carbone qui sont présentées ci-après rendent compte tour à tour d'une situation sans dispositif de flexibilité, puis de situations hypothétiques où des marchés de permis d'émission seraient instaurés. Ces développements visent avant tout à confirmer et à quantifier les avantages économiques d'un marché de permis par rapport à une situation sans échange et à donner des ordres de grandeur tant des valeurs nationales du carbone que des prix des permis d'émission selon la configuration du marché.

## Les valeurs nationales du carbone sans recours aux dispositifs de flexibilité

Dans un cas sans échange, la valeur nationale du carbone correspond au coût marginal de réduction lorsque la totalité des réductions d'émissions doit s'opérer à l'intérieur d'un pays. Le TABLEAU 1 présente les valeurs du carbone obtenues par différents modèles pour quelques pays, en 2010. Les objectifs de réduction d'émissions, pris en compte dans les modèles pour 2010, sont ceux du protocole de Kyoto. Dans un souci de comparabilité, les valeurs du carbone affichées sont toutes exprimées en dollars de 1990 par tonne de carbone<sup>14</sup>.

Le tableau 1 permet de souligner d'importants écarts dans les valeurs du carbone obtenues. L'ENCADRÉ 2 apporte quelques éclaircissements sur l'origine de ces écarts. Cependant il convient d'indiquer au préalable qu'ils sont bien moindres que ceux apparaissant dans les évaluations du coût des dommages dans les approches coûts-avantages, et ensuite qu'ils sont susceptibles d'être réduits par une homogénéisation des hypothèses exogènes, puisqu'ils proviennent pour partie des différences sur les projections de référence (Criqui & al., 1999).

13. La comparaison des valeurs du carbone des modèles a été menée à partir des sources principales d'informations suivantes : Energy Information Administration (EIA) (1998), chapitres 6 et 7 ; Ellerman & al. (1998) ; Bernard & al. (1999) ; Edmonds & al. (1999) ; AEA (1998) ; Bernstein & al. (1999) ; Gielen & al. (1998), ainsi que l'échange direct avec certains auteurs.

14. Certaines valeurs ont ainsi été l'objet d'une conversion préalable qui explique la différence par rapport à la source initiale d'où elles ont été tirées.  
Déflateur du PIB utilisé (indice 100 en 1987) : 1985 : 94,52 ; 1990 : 113,31 ; 1992 : 120,92 ; 1995 : 129,6 ; 1996 : 132,19.  
Source : Enerdata. Taux de change 1 ÉCU 1990 = 1,27 dollar 1990.



TABLEAU 1

Valeurs nationales du carbone en 2010 (objectif Kyoto)						
En \$1990/tC						
Modèle	Laboratoire ou étude (localisation)	États-Unis	Japon	Union européenne	France	Remarques
<b>Modèles d'équilibre général appliqué</b>						
MRT	CRA (États-Unis)	240	409	183		
MERGE	EPRI (États-Unis)	240				
WEFA	WEFA (États-Unis)	227				
EPPA	MIT (États-Unis)	223	700	327		UE12 (avant 1992)
SGM	PNNL (1998)* (États-Unis)	189				
SGM	AEA (États-Unis)	167				6 GES
SGM	PNNL (1999)* (États-Unis)	157	429	122		6 GES ; nouvelles capacités de production nucléaire en UE
				135		6 GES ; pas de nouvelles capacités de production nucléaire en UE
GemWTraP	CEA/Min. équipt (France)	167	260	350	329	UE11 (UE 1992, sans France)
<b>Modèles énergétiques</b>						
NEMS	EIA (États-Unis)	298				
POLES	IEPE (France)	136	195	136	195	UE15
MARKAL	ECN (Hollande)			160		CO <sub>2</sub> seul ; UE12 (sans Irl, Austr., Lux.)
				51		6 GES ; UE12 (sans Irl, Austr., Lux.)

\* PNNL (1998) : étude présentée dans EIA (1998) ; PNNL (1999) : étude présentée dans Edmonds & al. (1999).

ENCADRÉ 2

Les principaux facteurs explicatifs des différences dans les valeurs du carbone

Pour un objectif de réduction donné en pourcentage par rapport à une année de base, la valeur du carbone dépend d'une part du niveau des émissions dans le scénario de référence, et d'autre part de la pente de la courbe de coût marginal de réduction.

Le scénario de référence représente les projections d'émissions en 2010, si aucune action n'était engagée pour réduire les émissions (*business as usual* ou *baseline*). Plus le scénario de référence fait apparaître une croissance forte des émissions en 2010, plus le volume de réductions à opérer est élevé par rapport aux émissions de l'année de base, pour un objectif donné en pourcentage de réduction par rapport à l'année de base. Le coût marginal de réduction en est alors d'autant plus élevé.

De plus, en fonction de leurs spécifications, les modèles étudiés aboutissent à des courbes de coûts marginaux de réduction dont les pentes attestent d'une plus ou moins grande sensibilité des émissions à la valeur du carbone, qui pourrait être analysée en termes d'élasticité des émissions à la valeur du carbone.

Dans les modèles étudiés, les principaux facteurs déterminant le niveau des émissions du scénario de référence sont :

- les hypothèses de croissance économique ;
- l'évolution structurelle projetée du système énergétique ;
- les gaz à effet de serre considérés (soit le seul CO<sub>2</sub>, soit les six gaz à effet de serre) ;
- la prise en compte ou non des puits de séquestration du carbone.

La pente des courbes de coûts marginaux de réduction dépend pour sa part essentiellement :

- des caractéristiques du modèle et notamment du type de coût calculé ;
- du degré d'anticipation des contraintes d'émission (politiques précoces ou tardives) et des délais d'ajustement aux politiques adoptées ;
- du degré de connaissance du futur (parfaite connaissance ou myopie) ;
- des élasticités de la demande et de substitution inter-énergétique ;
- de la représentation du capital et des technologies ;
- de la durée de vie des équipements, en particulier des grands équipements de production d'électricité (centrales nucléaires et centrales thermiques au charbon)<sup>15</sup>.

Dans les études disponibles, c'est pour le Japon que l'écart est le plus fort : le rapport entre la valeur la plus faible et la plus élevée est de 3,5 (195 dollars-700 dollars). Par ailleurs, cinq études donnent des valeurs du carbone à la fois pour les États-Unis, le Japon et l'Union européenne. Pour chacune de ces études, le Japon affiche la valeur du carbone la plus élevée. Comme on l'a déjà souligné par ailleurs, cela ne signifie pas forcément que le coût total du respect des objectifs de Kyoto soit plus élevé pour le Japon que pour les États-Unis (ou l'Union européenne). Dans POLES, en l'occurrence, le coût total est estimé à 5,3 milliards de dollars (G\$90) pour le Japon et à 28 G\$90 pour les États-Unis, soit des « taux d'effort » – ratio du coût total ramené au PIB en 2010 – respectifs de 0,16 % et de 0,32 % du PIB, pour des coûts marginaux de réduction de 195 dollars et de 136 dollars.

### La valeur internationale du carbone dans différentes configurations de marchés

Comme on l'a vu précédemment, la valeur internationale du carbone peut exister dès lors qu'il y a possibilité d'échange de permis d'émission entre des pays. Elle est déterminée par l'égalisation des coûts marginaux de réduction de tous les pays participant à l'échange et correspond au prix du permis d'émission tel qu'il résulterait de l'instauration d'un marché parfait.

#### VALEUR INTERNATIONALE DU CARBONE DANS UNE HYPOTHÈSE DE MARCHÉ PARFAIT

Le TABLEAU 2 présente les valeurs internationales du carbone obtenues par les différents modèles, en fonction de diverses configurations de marché (ou « bulles »), c'est-à-dire en fonction des pays participant au marché<sup>16</sup>. Dans la configuration de marché « Annexe B », les modèles aboutissent à une valeur

15. Pour une présentation détaillée de l'influence de ces facteurs, voir Blanchard & Criqui (1999).

16. Les modalités pratiques d'échanges de permis au sein d'une bulle n'ont pas encore été spécifiées dans le cadre de la négociation internationale et laissent envisageables, pour l'heure, aussi bien la participation des États que celle des entreprises. Cela dit, les valeurs du carbone obtenues sont indépendantes de ces modalités.

TABLEAU 2

Valeurs internationales du carbone en 2010 (objectif Kyoto)

Modèle	Laboratoire ou étude (localisation)	Union européenne (1)	France + reste UE (2) + États-Unis + Japon	Annexe B sans Europe de l'est	Annexe B sans UE	Annexe B sans UE + PED clés (3)	Annexe B + PED clés	Marché mondial	En \$1990/tC
<b>Modèles d'équilibre général appliqué</b>									
EPPA	MIT (États-Unis)				150			29	5,2
GemWTraP	CEA/Min égypt (France)	211			105				
MERGE	EPRI (États-Unis)				98			70	1,4
DRI	EIA (États-Unis)				94			27	2,9
MRT	CRA (États-Unis)				79				
SGM	PNNL (1998)*, (États-Unis) (CO <sub>2</sub> )				86			24	2,8
SGM	PNNL (1999)*, (États-Unis) (6 GES) AEA, (États-Unis) (6 GES)				68	60			
					47	25	12	20	
<b>Modèles énergétiques</b>									
POLES	IIEPE	136	140	139	53	40	16	18	2,9
MARKAL	ECN, (Hollande) (CO <sub>2</sub> ) (6 GES)	160					23		
		51							

\* PNNL (1998) : étude présentée dans EIA (1998) ; PNNL (1999) : étude présentée dans Edmonds & al. (1999).

(1) Union européenne à 15 pour POLES, à 12 (sans Autr, Irl, Lux) pour MARKAL.

(2) Reste UE = UE 12 (1992) moins France pour GemWTraP, UE 15 moins France pour POLES.

(3) PED « clés » = Inde, Chine, Corée du Sud, Mexique.

internationale du carbone comprise entre 53 et 150 dollars, lorsque les réductions d'émissions concernent le seul CO<sub>2</sub>. Les études qui incluent les six gaz à effet de serre font apparaître un prix du permis inférieur (47 dollars – 68 dollars).

Dans l'hypothèse où un marché mondial serait créé, ou au moins un marché comprenant les pays industrialisés (Annexe B) et les pays en développement « clés »<sup>17</sup>, le prix du permis se situerait entre 18 et 29 dollars pour la quasi-totalité des études. Seul le modèle MERGE aboutit à une valeur nettement supérieure (70 dollars).

La lecture horizontale du TABLEAU 2 (comparaison de la valeur du carbone pour un même modèle en fonction des diverses configurations de marché) montre que l'élargissement du marché, de l'Annexe B à un marché mondial, mène dans tous les modèles à une baisse importante de la valeur du carbone : celle-ci serait divisée d'un facteur 3 à 5 (sauf pour MERGE : division par 1,4 seulement). Cela est dû à l'existence d'importants potentiels de réduction des émissions à coût marginal faible ou modéré dans les pays en développement. Le résultat de la réduction significative des coûts marginaux dans l'hypothèse d'une extension large de la flexibilité apparaît donc largement indépendant du type du modèle, comme le montre la dernière colonne du TABLEAU 2.

Les pays en transition présentent évidemment des potentiels importants de réduction de leurs émissions à coût faible ou nul. En particulier, « l'air chaud », essentiellement dégagé par la Russie et l'Ukraine, a un impact considérable sur la valeur internationale du carbone : pour ces pays, le coût des réductions est nul pour les droits correspondant à l'écart entre leurs émissions effectives en 2010 et celles de l'année de référence, droits qu'ils peuvent cependant échanger avec d'autres pays.

Ainsi, quand on réduit le marché Annexe B à des bulles sans les pays en transition, la valeur internationale du carbone en 2010 est beaucoup plus élevée que dans l'hypothèse de la bulle « Annexe B ».

À l'inverse, dès lors que les pays en transition et/ou les pays en développement font partie de la bulle et que l'on exclut des pays à coût marginal élevé (tels que ceux de l'Union européenne), la valeur du carbone décroît : c'est le cas des bulles « Annexe B sans Union européenne » et « Annexe B sans Union européenne + PED clés » du TABLEAU 2.

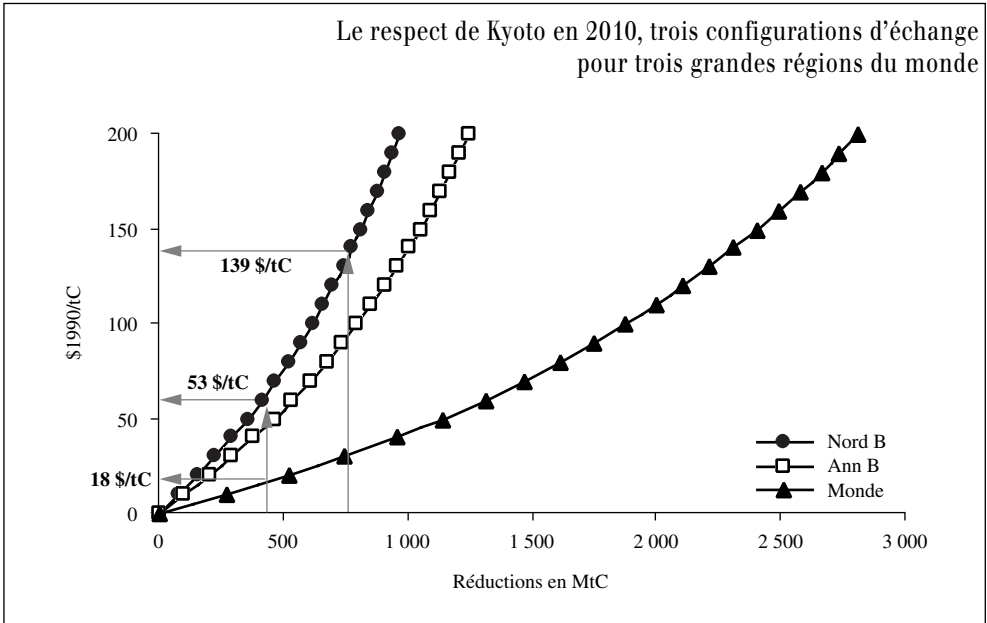
Le GRAPHIQUE 5, établi à partir des valeurs du carbone obtenues dans POLES, illustre ces conclusions générales. Pour un marché limité aux pays de l'Annexe B, la valeur internationale du carbone serait de 53 dollars pour un montant de réductions de 480 MtC. Si seuls les pays du Nord de l'Annexe B avaient accès aux permis d'émission (cette hypothèse exclut les pays en transition), la valeur du carbone s'établirait à 139 dollars/tC, car les pays qui participeraient à l'échange ne pourraient plus bénéficier de « l'air chaud » des économies en transition et devraient donc procéder en totalité à de réelles réductions d'émissions (770 MtC). Si tous les pays du monde participaient à l'échange, les réductions à effectuer seraient celles de l'Annexe B (480 MtC)<sup>18</sup> et la valeur du carbone (ou encore le

17. Pour les pays actuellement non contraints dans le protocole de Kyoto, les modèles supposent que les réductions d'émissions comptabilisées en 2010 sont celles qui seraient effectuées par rapport au scénario de référence (« business as usual ») de 2010, dans l'hypothèse où une taxe carbone fictive serait introduite. Plus la taxe carbone est élevée, plus les réductions le sont.

18. Car les pays non Annexe B ne sont pas contraints de réduire leurs émissions dans le protocole de Kyoto.

prix du permis) diminuerait beaucoup (18 dollars/tC), en raison d'une offre de permis abondante, correspondant à la mobilisation de potentiels de réduction importants dans les pays en développement <sup>19</sup>.

GRAPHIQUE 5



Source : Modèles POLES.

En tout cas, quel que soit le modèle considéré, l'instauration d'un marché de permis d'émission, même circonscrit aux pays de l'Annexe B, présenterait un intérêt manifeste pour certains pays comme les États-Unis, le Japon ou la France. En effet, dans chaque modèle, les valeurs nationales respectives du carbone (sans marché) seraient bien supérieures à la valeur internationale du carbone au sein de la bulle « Annexe B ». Dans ces conditions, et cela est le cas de tout pays acheteur de permis, ces pays réduiraient leurs émissions sur leur sol jusqu'au point où le coût marginal de réduction serait égal au prix international du permis. Pour les réductions dont le coût marginal dépasse la valeur internationale du carbone, ils achèteraient des permis à d'autres pays, où le coût marginal de réduction est au plus égal au prix du permis.

De façon plus générale, il a été montré par ailleurs que tous les pays, acheteurs ou vendeurs, gagnent à l'échange sur un marché de permis d'émission, par rapport à une situation sans échange. En outre, plus le marché est étendu, plus le gain global est important ; mais la répartition de ce gain entre les pays peut évoluer en fonction des bulles considérées (Blanchard & *al.*, 1998 ; Ellerman & *al.*, 1998).

19. Conformément à l'hypothèse envisagée précédemment, ces pays pourraient faire valider des réductions d'émissions en 2010 dès lors qu'ils effectueraient des réductions par rapport aux émissions du scénario de référence.

Le bien-fondé d'un marché de permis d'émission apparaît donc clairement d'un strict point de vue coûts-efficacité. Cependant, les chiffres bruts exposés ci-dessus pour les valeurs nationales et internationales du carbone attestent d'écarts importants dans les résultats des divers modèles. Par conséquent, les évaluations des coûts totaux de réduction des émissions sont, elles aussi, différentes.

## VALEUR INTERNATIONALE DU CARBONE ET MARCHÉ IMPARFAIT

Les études présentées précédemment ouvrent la voie à de nouveaux développements. Il s'agit en particulier de relâcher l'hypothèse de marché de permis d'émission en concurrence parfaite et d'analyser les conséquences de marchés imparfaits sur la valeur internationale du carbone.

En effet, les valeurs internationales du carbone révélées précédemment dans les différents modèles s'appuient sur l'hypothèse d'un fonctionnement parfait du marché des permis d'émission au sein de la bulle considérée. Cela signifie en particulier qu'il n'existe aucune contrainte aux échanges, aucun coût de transaction et aucun comportement de collusion, voire de monopole. Les valeurs du carbone obtenues sont donc des valeurs minimales et les volumes des échanges maximaux. Cependant, dans le contexte actuel des négociations internationales, plusieurs entraves à la mise en œuvre d'un marché parfait se dessinent, et en particulier celles de l'introduction de contraintes portant sur le volume des échanges (propositions européennes) ou sur le prix maximum des permis (propositions américaines). C'est pourquoi les réflexions actuelles des équipes de modélisation s'orientent vers l'analyse de diverses hypothèses de marché imparfait (Criqui & *al.*, 1999 ; Ellerman & *al.*, 1998 ; Bernstein & *al.*, 1999 ; Edmonds & *al.*, 1998).

Les contraintes aux échanges peuvent s'appliquer soit aux offreurs de permis, soit aux demandeurs. Du côté de l'offre, des scénarios envisagent la limitation, pour les pays d'Europe de l'Est et la Russie, des ventes de permis d'émission correspondant à de l'air chaud. L'existence de coûts de transaction, par exemple dans les projets relevant de l'Application Conjointe ou du Mécanisme de Développement Propre, peut être aussi source d'une limitation de l'offre par rapport à une situation parfaitement concurrentielle. Du côté de la demande, les plafonds, préconisés par certains pays de l'Union européenne sous le nom de *concrete ceilings*, consistent à restreindre l'accès des pays au marché de permis d'émission, en obligeant les pays à effectuer une proportion minimale donnée de leurs réductions d'émissions à l'intérieur de leurs frontières.

La situation de monopole de la région « Pays d'Europe de l'Est + Russie » pour la vente de permis au sein de la bulle « Annexe B » est également analysée dans plusieurs articles. Le pouvoir de monopole pourrait en effet conduire cette région à réduire l'offre de façon à augmenter le prix des permis.

En conséquence, dans toutes ces situations, l'efficacité économique n'est plus assurée comme dans le cadre d'un marché parfait : le coût global des réductions d'émissions au sein de la bulle considérée serait alors probablement très supérieur.

### La transposition de la problématique internationale au niveau sectoriel d'un pays

À l'instar de la situation prévalant sur la scène internationale, où la valeur du carbone dépend des objectifs de réduction, des coûts marginaux de

réduction des différents pays et de l'extension de la flexibilité internationale, la valeur nationale du carbone d'un pays est la résultante des coûts marginaux des divers secteurs de l'économie considérée, pour un niveau donné de réduction d'émissions.

Dans l'objectif d'analyser les enjeux inter-sectoriels des politiques nationales, les modèles présentant une désagrégation fine offrent la possibilité de calculer des coûts marginaux de réduction pour différents secteurs. Ainsi avec le modèle POLES, il est possible de distinguer les secteurs de l'industrie, des services, des transports, du résidentiel, enfin celui de la production d'électricité. L'exercice d'analyse des courbes sectorielles de coûts marginaux et de leurs conséquences pour l'élaboration d'une politique nationale a été mené avec ce modèle pour le cas de la France.

Le GRAPHIQUE 6 présente l'ensemble des courbes sectorielles : l'axe des abscisses représente les réductions d'émissions effectuées en 2010 par rapport aux émissions de 1990. L'axe des ordonnées correspond au montant de la taxe carbone fictive ou valeur du carbone. Ainsi, l'intersection des courbes de coûts marginaux avec l'axe des abscisses fait apparaître les réductions (ou augmentations) des émissions en 2010, par rapport à 1990, telles qu'elles sont calculées dans le scénario de référence (*business as usual*) : aucune taxe carbone fictive ne contraint alors les émissions.

Les courbes de coûts marginaux des secteurs transports, services et résidentiel attestent d'une part de la dynamique des émissions dans ces secteurs, d'autre part de leur faible élasticité à la valeur du carbone. Compte tenu du type de modélisation retenu, il semble qu'il sera difficile de mobiliser des potentiels de réductions d'émissions à bas coûts dans ces secteurs. À l'inverse, en 2010, le secteur électrique et l'industrie ont un niveau d'émissions dans la projection de référence inférieur au niveau 1990 et semblent présenter d'importants potentiels de réductions à coût marginal faible.

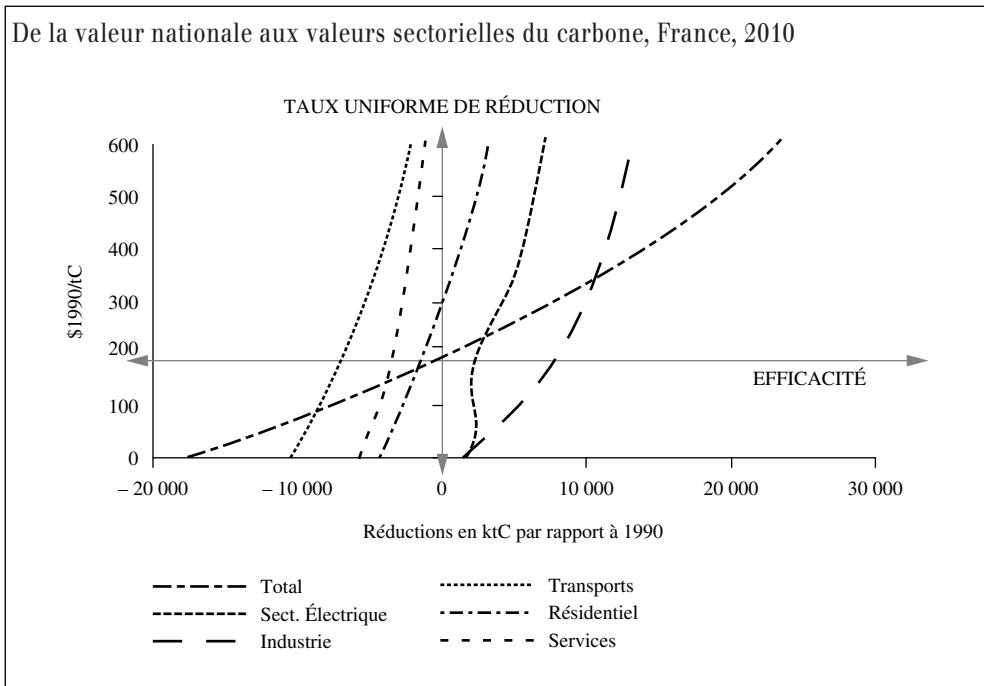
Cela découle largement du fait que les prix de l'énergie sont aujourd'hui beaucoup plus élevés – en raison de la taxation pré-existante – dans le secteur résidentiel, et *a fortiori* dans celui des transports, que dans l'industrie. L'introduction d'une même taxe carbone a alors un impact bien moindre sur le prix au consommateur final dans les deux premiers secteurs que dans le dernier, et elle se traduit par des réductions moins importantes. Ce phénomène ne constitue pas pour autant un artefact de la modélisation : il y a au contraire tout lieu de penser qu'il correspond bien à des phénomènes économiques réels, dont atteste en particulier la difficulté à infléchir, dans tous les pays, les dynamiques de transport à partir des seuls signaux de prix.

Il résulte de cette situation que l'on retrouve dans des exercices similaires menés pour d'autres pays, que dans une politique privilégiant l'efficacité économique maximum (égalisation des coûts marginaux de réduction), les secteurs électrique et industrie réaliseraient l'essentiel des réductions nécessaires pour respecter l'objectif de Kyoto. En effet, la barre horizontale sur le GRAPHIQUE 6 indique le niveau uniforme du coût marginal de réduction qu'imposerait la valeur nationale du carbone pour un cas sans système de flexibilité internationale (195 dollars/tC) : les réductions correspondantes sont d'environ 8MtC pour l'industrie, 2 MtC pour l'électricité, mais les émissions augmenteraient encore de 1 MtC dans le résidentiel, 4 MtC dans les services et 7 MtC dans les transports.

Inversement, dans une perspective privilégiant des objectifs sectoriels identiques, perspective qui serait basée sur un taux uniforme de réduction des émissions (0 %), la stabilisation des émissions au niveau de 1990 mènerait à un coût marginal de réduction très important dans les transports et les services, et à un coût nul pour les secteurs électrique et industriel, puisque ces deux derniers secteurs sont déjà en dessous de leurs niveaux 1990 dans la projection de référence. Nul n'est besoin de souligner que dans ce cas le coût total du programme de réduction serait très probablement beaucoup plus élevé.

GRAPHIQUE 6

De la valeur nationale aux valeurs sectorielles du carbone, France, 2010



Source : Modèles POLES.

Cette analyse s'avère intéressante à plusieurs titres : elle peut permettre de mieux comprendre et anticiper les positions des acteurs des différents secteurs vis-à-vis de la négociation sur le changement climatique ; elle contribue à informer les pouvoirs publics sur la structure des coûts de réduction, avant qu'ils ne définissent les objectifs et les mesures sectorielles susceptibles de conduire au respect de l'objectif de stabilisation des émissions à l'horizon 2010.

Le dilemme « équité-efficacité » que l'on rencontre pour l'élaboration des stratégies de réduction des émissions au plan international se retrouve donc *mutatis mutandi* au plan strictement national. Deux stratégies extrêmes – elles sont même « orthogonales » dans notre schéma – sont en effet possibles. Elles consisteraient soit à prélever une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> uniforme pour tous les secteurs (égale à la valeur nationale du carbone) dans le cas d'un primat accordé à



l'efficacité économique, soit à fixer un taux uniforme de réduction des émissions (0 %) si l'on privilégiait l'équilibre dans les objectifs sectoriels.

Il apparaît de plus en plus clairement qu'aucune de ces stratégies ne pourra être mise en place sous une forme pure, compte tenu des conséquences économiques, tant sectorielles que globales, qu'elles entraîneraient : des solutions intermédiaires ou « hybrides » devront sans doute être inventées. Le troisième Plan national de lutte contre l'effet de serre s'inscrit dans une telle perspective : outre les « Politiques et Mesures » sectorielles proposées, le recours aux instruments de marché (taxes et permis d'émission) est jugé indispensable pour atteindre l'objectif du protocole de Kyoto. Mais le niveau de taxation diffère d'un secteur à l'autre <sup>20</sup> et l'échange de permis d'émission n'est envisagé que pour l'industrie (Mission interministérielle de l'effet de serre [MIES], 2000).

Il existerait certes une solution globale, à la fois théoriquement satisfaisante (parce qu'efficace, *in fine*) et peut-être aussi – à terme – politiquement acceptable, c'est celle qui consisterait à combiner ces deux stratégies, par l'ouverture d'un marché intérieur ou européen des droits d'émission : l'État pourrait adopter des taux de réduction uniformes pour tous les secteurs (0 % pour respecter l'engagement de la France) mais en autorisant alors l'échange de permis entre les différents secteurs, en France ou en Europe <sup>21</sup>.

Les conditions pratiques de la mise en application de cette proposition demandent sans doute à être étudiées plus avant. Mais celle-ci, à l'instar des systèmes internationaux d'échange de droits d'émission, réconcilierait équité et efficacité, en permettant d'abord aux pouvoirs publics de spécifier *a priori* les droits sur l'environnement alloués aux différents acteurs économiques, avant que les mécanismes d'échange ne permettent de retrouver *in fine* l'efficacité économique dans l'action en faveur de l'environnement.

## Conclusion

L'analyse coûts-efficacité s'impose dès lors que l'on veut étudier les conséquences du protocole de Kyoto en termes de coûts pour les différentes parties prenantes. Dans cette perspective, la valeur du carbone correspond au coût marginal de réduction des émissions, pour un objectif de réduction donné. Parce qu'il permet de synthétiser l'information sur les coûts marginaux de réduction, ce concept constitue un outil d'aide à la décision pour les États, tant au niveau des négociations internationales qu'au niveau des stratégies à mener à l'intérieur des pays. Il contribue ainsi à structurer, d'une part les réflexions sur l'arbitrage entre les efforts de réductions à fournir sur le territoire national et le degré de recours au marché international de permis, et d'autre part celles portant sur la répartition inter-sectorielle des réductions à effectuer au plan national.

La « valeur du carbone » constitue ainsi un concept-clé pour l'élaboration des politiques internationales et nationales de réduction des émissions de gaz à effet

20. Il s'agit essentiellement pour l'industrie, de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP), taxe dont seraient pour partie exonérées certaines entreprises fortement consommatrices d'énergie ; pour les transports, de la poursuite de la diminution de l'écart de la taxe intérieure sur les produits pétroliers (TIPP) entre l'essence et le gazole ; pour le résidentiel, et sous réserve des décisions européennes, d'une éventuelle taxe sur le gaz naturel combustible ; pour la production d'électricité d'une éventuelle taxation générale modulée en fonction du contenu en carbone des combustibles utilisés.

21. Proposition évoquée par M. Boiteux dans un groupe de travail sur les externalités du commissariat général du Plan et développée dans Blanchard & al. (1998).

de serre. En particulier, il en constitue un élément de cohérence, d'une part parce qu'il crée un lien entre niveau international et national, et d'autre part parce qu'il peut être associé à différents types d'instruments, de dispositifs ou de règles d'action.

Dans le contexte de l'application du Principe de Précaution en matière de changement climatique, la valeur du carbone peut en effet découler aussi bien d'une approche relevant de la régulation par les prix (taxes carbonées, internationales ou nationales) que de la régulation par les quantités (quotas et permis d'émission négociables, certificats de réduction d'émission dans les actions de mise en œuvre conjointe, normes et standards...).

Compte tenu des développements de la négociation internationale, la réflexion sur les manières les plus appropriées d'articuler les dimensions internationale, européenne et nationale, comme de combiner différents types d'instruments économiques apparaît hautement prioritaire dans l'agenda des recherches sur les politiques de lutte contre le changement climatique. Des choix dans ces domaines dépendront en effet les « valeurs du carbone » – implicites ou explicites – qui pourraient demain structurer l'évolution sur le long terme des systèmes énergétiques.

O. B.  
P. C.

#### RÉFÉRENCES

- Administration Economic Analysis (AEA), (1998), *The Kyoto Protocol and the President's Policies to Address Climate Change*, juillet.
- Arrow J.K. (1995), « Effet de serre et actualisation », *Revue de l'Energie*, n° 471, octobre, pp. 631-636.
- Bernard A. & M. Vielle (1999), *Efficient Allocation of a Global Environment Cost between Countries: Tradable Permits versus Taxes or Tradable Permits and Taxes? An Appraisal with a World General Equilibrium Model*, mimeo, 20 juillet.
- Bernstein P., W. Montgomery, T. Rutherford & G.F. Yang (1999), « Effects of Restrictions on International Permit Trading: the MS-MRT Model », *The Energy Journal*, numéro spécial, pp. 221-256.
- Birdsall N. & A. Steer (1993), « Act Now on Global Warming ; but Don't Cook the Books », *Finance and Development*, 30 (1), pp. 6-8.
- Blanchard O., P. Criqui, M. Trommetter & L. Viguier (1998), *Différenciation, équité internationale et efficacité dans la lutte contre le changement climatique global*, Communication aux journées de l'AFSE, 1998, consacrées à l'économie de l'environnement et des ressources naturelles, Toulouse, 11-12 mai.
- Blanchard O. & P. Criqui (1999), *Le concept de « valeur du carbone », évaluations et applications dans les politiques de lutte contre le changement climatique*, Grenoble, Institut d'économie et de politique de l'énergie (Contrat pour le Commissariat général du Plan, Club « Energie, prospective et débats »).
- Cline W.R. (1992), *The Economics of Global Warming*, Washington DC: Institute for International Economics.
- Commission européenne (2000), *Livre vert sur l'établissement dans l'Union européenne d'un système d'échanges de droits d'émissions des gaz à effet de serre*, COM(2000) 87, 8 mars.
- Commissariat Général du Plan (CGP) (1998), *Energie 2010-2020, les chemins d'une croissance sobre*, Paris, La Documentation française, septembre.

- Cornut P. (1998), *Articulations et complémentarités entre le Mécanisme de Développement Propre et les Fonds pour l'environnement mondial : une première mise en perspective*, Fonds français pour l'Environnement mondial, Conseil scientifique et technique, réf 1998/DEPR/FEM-C.Gar/DSP n° 421.
- Cornut P. & P. Menanteau (1997), *L'application conjointe et la prévention du risque climatique : approche théorique et premières réalisations*, Fonds français pour l'Environnement mondial, Conseil scientifique et technique.
- Criqui P. & al. (1996), *POLES 2.2.*, Programme JOULE II, Commission européenne, direction Science, Recherche et Développement (DG XII), Bruxelles, décembre.
- Criqui P. & N. Kouvaritakis (1997), « Les coûts pour le secteur énergétique de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> : une évaluation internationale avec le modèle POLES », *Cahier de Recherche de l'IEPE*, n° 13, IEPE, Grenoble.
- Criqui P., S. Mima & L. Viguier (1999), « Marginal Abatement Costs of CO<sub>2</sub> Emission Reductions, Geographical Flexibility and Concrete Ceilings: an Assessment Using the POLES Model », *Energy Policy*, octobre, n° 27, pp. 585-601.
- Edmonds J., C. MacCracken, R. Sands & S. Kim (1999), « The Economics of the Kyoto Protocol », *The Energy Journal*, numéro spécial, pp. 25-72.
- Ellerman D., H. Jacoby & A. Decaux (1998), *The Effects on Developing Countries of the Kyoto Protocol and CO<sub>2</sub> Emissions Trading*, Cambridge MA: MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, rapport n° 41, novembre.
- Energy Information Administration (EIA) (1997), *International Energy Outlook*, Washington DC: Department of Energy.
- \_\_\_\_\_ (1998), *Impacts of the Kyoto Protocol on U.S. Energy Markets and Economic Activity*, Washington DC: Department of Energy, octobre.
- Eyre N., T. Downing, R. Hoekstra, K. Rennings & R.S.J. Tol (1998), *Externe, Externalities of Energy, Global Warming Damages*, rapport final, septembre.
- GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) groupe de travail III (1996a), « Aspects socio-économiques de l'évolution du climat ; résumé à l'intention des décideurs », *Les Cahiers de Global Chance*, n° 7, juillet, pp. 73-91.
- \_\_\_\_\_ (1996b), « Aspects socio-économiques de l'évolution du climat ; résumé officiel », *Les Cahiers de Global Chance*, n° 7, juillet, pp. 93-115.
- Gielen D.J., P.R. Koutstaal, T. Kram & S.N.M. van Rooijen (1998), *Post-Kyoto ; Effects on the Climate Policy of the European Union*, ECN-C-98-040, Petten, juin.
- Godard O. (1999), « La dimension de l'équité dans les négociations sur le climat », *Les Cahiers de Global Chance*, n° 12, novembre, pp. 8-14.
- Hourcade J.-C. (1996), « L'expertise IPCC – Aspects socio-économiques : consensus inespéré ou artefact rhétorique ? », *Les Cahiers de Global Chance*, n° 7, juillet, pp. 63-72.
- \_\_\_\_\_ (1997), « Précaution et approche séquentielle de la décision face aux risques climatiques de l'effet de serre », dans *Le Principe de Précaution dans la conduite des affaires humaines*, sous la direction de O. Godard, Éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris, INRA.
- International Energy Agency (IEA) (1996), *World Energy Outlook*, Paris, OCDE.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1996), *Climate Change 1995 – Economic and Social Dimensions of Climate Change*, contribution du groupe de travail III, the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press.
- Manne A. & R. Richels (1999), « The Kyoto Protocol: a Cost-Effective Strategy for Meeting Environmental Objectives ? », *The Energy Journal*, numéro spécial, pp. 1-24.
- Mendelsohn R. (1998), « Climate Change Damages », dans *Economics and Policy Issues in Climate Change*, sous la direction de W.D. Nordhaus, Washington DC : Resources for the Future, pp. 219-236.

- Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES) (2000), *Programme national de lutte contre le changement climatique*, 19 janvier, à paraître à la Documentation française.
- Nordhaus W.D. (1991), « To Slow or Not to Slow: the Economics of the Greenhouse Effect », *Economic Journal*, n° 101 (407), pp. 920-937.
- Portney P.R. (1998), « Applicability of Cost-Benefit Analysis to Climate Change », dans *Economics and Policy Issues in Climate Change*, sous la direction de W.D. Nordhaus, Washington DC: Resources for the Future, pp. 111-127.
- Union européenne (1999), *Community Strategy on Climate Change – Council Conclusions*, Conseil européen, 8346/99, Bruxelles, 18 mai.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (1992), New York, 9 mai.  
\_\_\_\_\_ (1997), *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- World Energy Council – International Institute for Applied Systems Analysis (WEC-IAASA) (1995), *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, Londres.