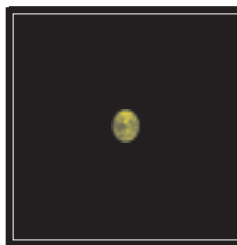
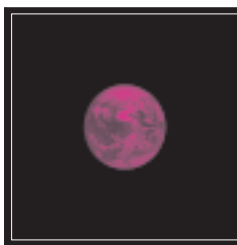


CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE



BILAN
ET PERSPECTIVES
DU PROTOCOLE
DE KYOTO

© OCDE, 2000

© Logiciel, 1987-1996, Acrobat, marque déposée d'ADOBE.

Tous droits du producteur et du propriétaire de ce produit sont réservés. L'OCDE autorise la reproduction d'un seul exemplaire de ce programme pour usage personnel et non commercial uniquement. Sauf autorisation, la duplication, la location, le prêt, l'utilisation de ce produit pour exécution publique sont interdits. Ce programme, les données y afférentes et d'autres éléments doivent donc être traités comme toute autre documentation sur laquelle s'exerce la protection par le droit d'auteur.

Les demandes sont à adresser au :

Chef de la division des Publications
Direction des relations publiques et de la communication
2, rue André-Pascal
75775 Paris, Cedex 16, France.

Contre le changement climatique

*Bilan et perspectives
du Protocole de Kyoto*

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale ;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique ;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996) et la Corée (12 décembre 1996). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

Also available in English under the title:

Action Against Climate Change: The Kyoto Protocol and Beyond

© OCDE 1999

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, Tél. (33-1) 44 07 47 70, Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, or CCC Online: <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation de reproduction ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.


Avant-propos

Cet ouvrage est la dernière publication en date que l'OCDE consacre aux aspects économiques du réchauffement climatique, travaux auxquels elle contribue depuis une dizaine d'années. L'inquiétude suscitée à l'échelle mondiale par le changement climatique a abouti en 1997 à la signature du Protocole de Kyoto par lequel la plupart des pays de l'OCDE ainsi qu'un certain nombre d'autres pays se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. L'accumulation de ces gaz dans l'atmosphère terrestre est susceptible d'avoir des conséquences à long terme sur le climat. Cette étude aborde quelques-uns des problèmes qui restent à résoudre avant de pouvoir mettre en pratique le Protocole de Kyoto. Elle analyse aussi les coûts économiques induits par les réductions des émissions de gaz à effet de serre nécessaires pour atteindre les objectifs de Kyoto. Certains aspects importants de ces coûts sont examinés ici, en particulier la possibilité de réduire les émissions là où c'est moins coûteux de le faire. Partant du constat que le Protocole de Kyoto est en soi largement insuffisant pour éviter le changement climatique, cet ouvrage identifie certaines des conditions nécessaires à la mise en œuvre d'un accord global visant à stabiliser à long terme les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et les coûts économiques associés à cet objectif. Enfin, il propose une analyse préliminaire des coûts occasionnés par le changement climatique ainsi que des stratégies pour s'y adapter d'une manière aussi graduelle que possible.

L'élaboration de ce texte a été décidée sous l'impulsion du Comité de politique économique de l'OCDE, à la suite de la signature du Protocole de Kyoto. Une version précédente du rapport a été discutée par ce Comité et son Groupe de travail n° 1, de même que par le Comité de politique de l'environnement. Cet ouvrage s'inscrit dans le programme plus large de l'OCDE sur les aspects de politique économique associés au changement climatique. Il est produit conjointement avec *Changement climatique : les politiques nationales et le Protocole de Kyoto*, ouvrage consacré plus particulièrement aux politiques nationales de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La contribution de l'OCDE à la définition des politiques à mettre en œuvre face au changement climatique est un élément important du programme de trois ans sur le Développement Durable, entrepris sous l'égide des ministres de l'OCDE lors de la réunion annuelle du Conseil en avril 1998.

Les auteurs principaux de ce texte sont Jean-Marc Burniaux et Paul O'Brien, avec la collaboration de Christophe Complainville en ce qui concerne les aspects analytiques et la modélisation. Dong-Seok Choi a aussi contribué au contenu analytique. Anick Lotrous a fourni le support statistique tandis que l'assistance technique a été assurée par Muriel Duluc, Penelope El Ghadab et Jackie Gardel.

Cet ouvrage est publié sous ma responsabilité. De nombreuses incertitudes entourent encore les principaux aspects économiques du changement climatique. En ce sens, le but premier de ce texte est de stimuler le débat plus que d'apporter des réponses définitives.



Donald J. Johnston
Secrétaire général de l'OCDE

Table des matières

Contre le changement climatique : bilan et perspectives du Protocole de Kyoto	9
1. Introduction et résumé	9
2. Le Protocole de Kyoto et le processus du changement climatique	14
3. Répercussions du Protocole de Kyoto	28
4. Au-delà de la première période d'engagement : extension du Protocole de Kyoto dans le temps et dans l'espace	74
5. L'adaptation au changement climatique	98
Notes	115
Bibliographie	125
Glossaire et abréviations	133
<i>Annexe 1.</i> Avantages des échanges avec des sources d'énergie alternatives à long terme	137
<i>Annexe 2.</i> Conversion des émissions passées de CO ₂ en concentration future	143
<i>Annexe 3.</i> Définition des règles de partage de la charge	155
Encadrés	
1. Le modèle GREEN de l'OCDE	30
2. Émissions de CO ₂ dans le scénario de référence du modèle GREEN	32
3. Effets de la rigidité des salaires réels	40
4. « Fuites de carbone » : un problème non résolu	46
5. Importance du pouvoir de marché dans le commerce de permis d'émission	62
6. Parvenir à un accord mondial – la théorie	80
7. Y-a-t-il une règle d'équité derrière le Protocole de Kyoto ?	88
Tableaux	
1. Prévisions de croissance du PIB utilisées dans le scénario de référence simulé avec le modèle GREEN	33
2. Émissions de CO ₂ dans le scénario de référence simulé avec le modèle GREEN	34
3. Évolution des émissions de GES, objectifs de Kyoto et répartition des réductions au sein de l'Union européenne	35
4. Estimations des coûts économiques de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto en 2010 sans recours aux mécanismes de flexibilité	36
5. Impact économique des rigidités des salaires réels dans le contexte du Protocole de Kyoto	43

6. Taux de « fuite » dans le Protocole de Kyoto en fonction de diverses hypothèses.....	49
7. Coûts marginaux de réduction avec et sans échanges de droits d'émission.....	52
8. Mise en œuvre du Protocole : répartition des gains et des pertes provenant des échanges de permis, 2010.....	54
9. Répartition des variations du revenu réel à la suite de la suppression des subventions à l'énergie, en 2010.....	72
10. Coûts de différentes règles de partage de la charge pour les pays de l'Annexe 1....	96
11. Coûts de différentes règles de partage de la charge pour les pays hors Annexe 1...	98
A2.1. Réduction de la concentration induite par le Protocole de Kyoto : Comparaison des différents modèles du cycle du carbone.....	149
A2.2. Niveaux d'équilibre des émissions correspondant à la stabilisation de la concentration : comparaison des différents modèles du cycle du carbone ...	154

Graphiques

1. Mise en œuvre du Protocole : augmentation des prix de l'énergie en 2010.....	44
2. Mise en œuvre du Protocole : variations de la production en 2010.....	44
3. Mise en œuvre du Protocole : variation du PIB et du revenu réel en fonction de différents régimes d'échange de permis, 2010.....	53
4. Impact des limitations d'achats de permis.....	58
5. Impact des limitations de ventes de permis.....	60
6. Échange de permis par pays/région conformément au Protocole de Kyoto, 2010....	63
7. Coût de réduction des émissions pour les pays de l'OCDE suivant différentes structures de marché, 2010.....	66
8. Mise en œuvre du Protocole : coûts selon différentes chronologies.....	69
9. Mise en œuvre du Protocole : impact des subventions à l'énergie sur les coûts, 2010...	71
10. Coût à long terme du maintien des objectifs de Kyoto.....	76
11. Théorie de la formation des coalitions : courbes des rendements en fonction de la taille de la coalition.....	81
12. Le long terme : différents profils d'évolution des concentrations de CO ₂	87
13. Émissions et PIB par habitant en 1995.....	88
14. Réductions des émissions en 2010 en fonction du PIB par habitant pour les pays de l'Annexe 1.....	89
15. Partage de la charge selon différents scénarios, 2010-2050.....	91
16. Pertes moyennes de revenu réel annuel et mondial dans différents scénarios.....	94
17. Pertes moyennes de revenu réel annuel et mondial dans différents scénarios.....	94
18. Flux monétaires annuels moyens en fonction des différentes règles de partage des charges.....	96
A1.1. Courbe de coût marginal mondial concave à l'origine.....	139
A1.2. Courbe de coût marginal mondial convexe à l'origine.....	139
A1.3. Courbes de coût pour les États-Unis.....	140
A1.4. Courbes de coût pour l'Union européenne.....	140
A1.5. Courbes de coût pour le Japon.....	141
A1.6. Courbes de coût pour les autres pays OCDE.....	141
A1.7. Courbes de coût pour l'Europe orientale.....	142
A1.8. Courbes de coût pour la CEI.....	142

A2.1. Relation entre les émissions par habitant et le PIB par habitant dans le scénario de référence du modèle GREEN	144
A2.2. Trois fonctions de réponse différentes	146
A2.3. Fonctions de réponse pour différents niveaux de concentration ambiante.....	147
A2.4. Impact à long terme du Protocole de Kyoto sur les émissions de CO ₂ selon les prévisions du modèle GREEN	148
A2.5. Impact à long terme du Protocole de Kyoto sur les concentrations de CO ₂ selon les prévisions du modèle GREEN	148
A2.6. Différentes stratégies de réduction des émissions avec participation des pays hors Annexe 1	150
A2.7. Impact à long terme sur la concentration de CO ₂ des réductions d'émission avec participation des pays hors Annexe 1	150
A2.8. Différents profils de stabilisation des concentrations de CO ₂	153

Contre le changement climatique : bilan et perspectives du Protocole de Kyoto

1. Introduction et résumé

Selon les relevés météorologiques, les températures moyennes mondiales se sont élevées au cours du siècle écoulé. La tendance au réchauffement concorde avec les prévisions établies à partir des modèles du climat mondial, selon lesquelles les gaz à effet de serre, lorsque leurs concentrations augmentent, piègent des quantités de plus en plus grandes de chaleur dans l'atmosphère terrestre. Les concentrations accrues de gaz à effet de serre découlent, dans une large mesure, des émissions rejetées par suite des activités humaines – notamment la combustion de combustibles fossiles. Dans le contexte d'un consensus de plus en plus général du monde scientifique sur le fait que les émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre accentuent le réchauffement planétaire, les efforts internationaux en vue de réduire ces émissions ont atteint leur point culminant lors de la signature du Protocole de Kyoto, en décembre 1997.

La présente publication entend étudier quatre facettes de la question, traitées dans les quatre chapitres principaux. Le chapitre 2 décrit certains des principaux aspects du Protocole de Kyoto et examine des domaines dans lesquels la réussite de son application peut être influencée par les choix des moyens mis en œuvre à cet effet. Le chapitre suivant quantifie les coûts économiques de la mise en œuvre du Protocole en fonction d'hypothèses diverses sur la façon dont elle se déroulera. Le chapitre 4 analyse comment peut être déployé, à long terme, un effort crédible en vue de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre avec la participation des pays en développement. Le dernier chapitre porte sur la nature des modifications climatiques prévisibles dans les 50 à 100 prochaines années qui, pour une bonne part, sont indépendantes de la réussite de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto. Il aborde aussi certains aspects des problèmes d'adaptation aux évolutions du climat.

Le Protocole fixe, pour chacun des pays dits de l'Annexe 1, des objectifs d'émission de gaz à effet de serre à respecter entre 2008 et 2012 ; les pays concernés sont ceux de l'OCDE (à l'exception de la Corée, du Mexique et de la Turquie) et un certain nombre d'économies en transition, notamment la Russie. Ces objectifs

sont relativement ambitieux, en ce sens que les émissions de l'ensemble des pays de l'OCDE devront, en 2008-2012, être inférieures de quelque 20-40 pour cent au niveau qu'elles auraient atteint faute d'action gouvernementale. Si les pays devaient respecter leurs objectifs en prenant des mesures de réduction des émissions au niveau national, le coût pour les pays de l'OCDE se traduirait par une perte de revenu réel annuel de l'ordre de 0.25-1 pour cent, à la condition que l'ajustement accompagnant le renchérissement de l'énergie se fasse progressivement. Étant donné l'ampleur des hausses des prix de l'énergie, on ne peut tenir cette hypothèse pour acquise. Le coût marginal de la réduction des émissions peut être considéré comme équivalent à une taxe sur le carbone qui entraînerait un doublement ou un triplement du prix international du pétrole par rapport à son niveau de 1995. Des variations des prix d'une telle importance se traduiraient par une réaffectation considérable des ressources, et de la main-d'œuvre en particulier, d'un secteur de l'économie à l'autre. Elles entraîneront également des pertes de salaire réel, susceptibles d'induire des rigidités dont le résultat final sera une augmentation du chômage. Dans cette hypothèse, des analyses préliminaires montrent que les coûts de la réalisation des objectifs de Kyoto pourraient dépasser de beaucoup les estimations susmentionnées. La faible estimation de ces coûts pour les pays de l'OCDE ne tient pas seulement à l'hypothèse d'un ajustement graduel, mais s'explique aussi parce que certains pays non-membres de l'OCDE en supporteront une part, du fait des évolutions des termes de l'échange induites par la baisse de la demande de combustibles fossiles. Dans l'évaluation du coût économique, il faut toutefois tenir compte du fait que les simulations ne prennent pas en considération les « avantages secondaires » des réductions des émissions, par exemple une moindre pollution locale, qui peuvent aussi se révéler importants. Enfin, il importe de garder présent à l'esprit que cette évaluation est fondée sur des modèles économétriques qui laissent de côté les gaz à effet de serre (GES) autres que le CO₂ et que, par conséquent, elle surestime le plus souvent les coûts économiques liés au respect des objectifs de Kyoto.

Le Protocole prévoit un certain nombre de mécanismes susceptibles de réduire le coût de la réalisation des objectifs d'émission – et donc, d'augmenter la probabilité que le Protocole soit ratifié et les objectifs respectés. Les détails de ces mécanismes qui comprennent les échanges de droits d'émission, la « Mise en Œuvre Conjointe » et le « Mécanisme pour un Développement Propre », ne sont pas encore tout à fait explicités. Il importe de trouver un accord en la matière dans les délais prévus, c'est-à-dire d'ici à la fin de l'an 2000. Les mesures de lutte contre les émissions seront prises d'autant plus tardivement que l'on repoussera cette échéance, et le coût de réalisation des objectifs d'émission en sera sans doute d'autant plus lourd, comme le montrent les simulations présentées au chapitre 3.

Au moyen des mécanismes de flexibilité, on peut alléger sensiblement les coûts de réalisation des objectifs de Kyoto. Les échanges d'émissions permettent

d'égaliser les coûts marginaux des réductions d'émissions entre les différents pays de l'Annexe 1 grâce au commerce de permis d'émission, en offrant la possibilité de comptabiliser des réductions des émissions réalisées dans un pays où elles sont possibles à un coût relativement bas, en déduction de l'objectif d'un autre pays où il revient plus cher de les concrétiser. Ainsi, les deux pays peuvent en tirer profit. Si l'on réussissait, par ce biais, à uniformiser complètement les coûts marginaux de la lutte contre les émissions entre tous les pays de l'Annexe 1, le coût total de réalisation des objectifs pourrait être réduit d'un tiers pour les pays de l'OCDE, et devenir presque insignifiant pour l'ensemble des pays de l'Annexe 1, d'après les simulations effectuées à l'aide du modèle GREEN de l'OCDE. Il faut toutefois interpréter ce résultat en considérant que les hypothèses de départ sont fortes et les résultats des modèles incertains par nature.

Les échanges de droits d'émission soulèvent un certain nombre de problèmes qu'il faut résoudre pour qu'ils remplissent leurs promesses en termes de gains d'efficacité. Certaines questions sont de nature relativement technique et touchent, par exemple, au suivi, à la vérification et aux moyens d'assurer le respect des engagements. Compte tenu des incertitudes dans ces domaines, des voix se sont élevées pour préconiser des restrictions de ces échanges. On a également évoqué, pour justifier ces restrictions et l'effort national accru qu'elles impliquent, la nécessité pour les pays industrialisés de donner l'exemple afin d'encourager les pays en développement à accepter eux aussi des plafonds d'émission chiffrés, ainsi que les avantages secondaires d'un abaissement des émissions au niveau national (notamment, une moindre pollution locale). Cependant, ces restrictions auraient un prix : elles accroîtraient les coûts de réalisation des objectifs de Kyoto. Si, au lieu de recourir à des limitations générales des échanges, un groupe de pays de l'Annexe 1 en venait à imposer des restrictions unilatérales aux échanges de droits d'émission, leurs coûts augmenteraient alors que ceux des autres pays de l'Annexe 1 pourraient diminuer.

Il est intéressant de mentionner deux conséquences particulières de la participation des économies en transition à un système sans entraves d'échanges de droits d'émission. Premièrement, une partie des avantages apparents de ce commerce serait liée à l'augmentation des émissions globales : les émissions en Russie et en Ukraine seront sans doute considérablement inférieures à l'objectif de Kyoto, même si ces pays ne prennent aucune mesure pour les réduire ; en permettant aux pays de l'OCDE de laisser augmenter leurs émissions d'autant, les échanges réduisent les coûts pour ces derniers. L'absence d'échanges de permis concernant ces réductions fictives appelées « air chaud » pourrait réduire d'un cinquième environ les avantages découlant de ce commerce, compte tenu de la quantité d'« air chaud » qui figure dans le scénario de référence du modèle GREEN. Néanmoins, il serait politiquement difficile d'interdire ces échanges, et inefficace dans le contexte de la stabilisation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de

serre à long terme, car une autre disposition du Protocole (la « mise en réserve ») autorise à reporter à une date ultérieure l'utilisation (ou le commerce) de quotas d'émission non utilisés. Deuxièmement, étant donné que la Russie et l'Ukraine pourraient occuper une place prédominante sur le marché des permis d'émission en tant que fournisseurs, il existe un risque de concurrence imparfaite sur ce marché ; en cas de collusion ces deux pays seraient en mesure de maintenir les prix des permis à un niveau nettement supérieur à celui qui résulterait du jeu normal de la concurrence et les avantages des échanges de droits d'émission pourraient être moindres.

Outre l'échange de droits d'émission, le Protocole de Kyoto prévoit deux mécanismes de transfert d'émissions entre pays dans le cadre de projets. Alors que le mécanisme qu'il a été convenu d'appeler « Mise en Œuvre Conjointe » entre pays de l'Annexe I ressemble à celui des échanges de droits d'émission en ce qu'il donne lieu à des transferts de droits d'émission, le « Mécanisme pour un Développement Propre » permet aux pays de l'Annexe I d'acquérir ces droits par des investissements qui réduisent les émissions dans les pays en développement. Étant donné qu'il n'a pas été fixé d'objectifs d'émission dans ces pays, les transferts de droits d'émission doivent s'effectuer sur la base de niveaux de référence des émissions établis d'un commun accord pour chaque projet. Il est donc difficile d'évaluer l'importance que prendra ce mécanisme. Des analyses préliminaires ont tablé sur l'hypothèse selon laquelle on n'exploitera qu'une fraction des possibilités de réduction des émissions à faible coût dans les pays en développement et elles laissent à penser que les avantages à en tirer seront donc limités si ce mécanisme est adopté en même temps qu'un système d'échanges sans entraves des droits d'émission entre tous les pays de l'Annexe I.

Dans l'optique d'une action visant à freiner de manière appréciable le réchauffement de la planète, il vaut mieux considérer le Protocole de Kyoto comme le point de départ d'un effort à long terme en vue de réduire sensiblement les émissions mondiales de gaz à effet de serre et de stabiliser ou abaisser, à terme, leurs concentrations atmosphériques. Bien que les connaissances scientifiques soient encore largement insuffisantes pour apporter des réponses définitives, il ressort du chapitre 4 que les mesures prises exclusivement par les pays de l'Annexe I n'auront qu'une incidence marginale sur les concentrations, si les émissions des pays non visés à l'Annexe I continuent d'augmenter comme prévu sans aucune contrainte.

Il est difficile d'amener les pays hors Annexe I à accepter de telles contraintes, comme le montrent la troisième et la quatrième réunions de la Conférence des Parties de la Convention des Nations Unies sur le changement climatique. Ce n'est pas uniquement parce que les effets du changement climatique se feront ressentir différemment selon les pays – certains pays en développement seront sans doute plus gravement touchés que la plupart des pays de l'OCDE – ou que les percep-

tions nationales de ces effets ne sont pas les mêmes. L'analyse exposée au chapitre 4 laisse entendre qu'il y a peu de chances qu'un grand nombre de pays acceptent de leur plein gré de réduire leurs émissions en l'absence de paiements de transfert. Qui plus est, dans la cinquantaine d'années à venir, les préoccupations concernant l'équité risquent d'obliger les pays de l'Annexe 1 à réaliser des réductions des émissions beaucoup plus importantes que les pays en développement, dont les niveaux d'émission par habitant représentent des fractions minimes des leurs. Au demeurant, cette démarche serait inconciliable avec le souci d'atténuer le plus possible les coûts à l'échelle mondiale, à moins que les mécanismes de flexibilité soient suffisamment opérationnels et appliqués dans le monde entier.

Le chapitre 4 analyse des scénarios d'évolution des émissions mondiales compatibles avec une stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces scénarios diffèrent selon le degré d'ambition de la réduction des émissions mondiales mais aussi eu égard à la répartition entre les pays de l'effort d'ajustement. En particulier, les scénarios sont construits de façon à distribuer les droits d'émission en fonction des disparités économiques (autrement dit, en tenant compte de la « capacité à payer » de chaque pays), ou bien en postulant que les émissions par habitant des différents pays devront converger vers un niveau unique, relativement faible. Compte tenu de ces deux règles de partage de l'effort, et du fait que les coûts de la lutte contre les émissions varient largement d'un pays à l'autre, les échanges de permis deviennent un instrument essentiel pour empêcher les coûts d'augmenter. Selon que les profils d'évolution des émissions recherchés seront plus ou moins ambitieux, et en supposant que l'on procède à des échanges de permis, les coûts annuels pourraient être de l'ordre de 0.25-1 pour cent du PIB à l'échelon mondial. Cependant, les recettes provenant de la vente de permis ne suffiront peut-être pas à inciter les pays en développement à participer à un accord mondial, et le chapitre 4 envisage aussi la possibilité que les pays de l'Annexe 1 offrent des transferts financiers pour les encourager à y adhérer. Dans ce cas, les coûts annuels pourraient être substantiels pour les pays de l'Annexe 1 surtout dans le cas d'une réduction ambitieuse des émissions. Les estimations varient entre 1.5 et 2 pour cent du PIB des pays de l'Annexe 1, en fonction du degré d'ambition des objectifs.

En dépit des efforts accomplis dans l'optique du Protocole de Kyoto et d'un éventuel accord y faisant suite, une augmentation sensible des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre semble dès à présent impossible à éviter. Le chapitre 5 fait observer que le changement climatique qui en découlera est difficilement prévisible en l'état actuel des connaissances, surtout en ce qui concerne la variation des précipitations qui, dans de nombreuses régions, jouera un rôle plus décisif que celle des températures moyennes en ce qui concerne les coûts associés à l'évolution du climat. On peut donc tirer peu de conclusions sur ces coûts ou sur les stratégies d'adaptation appropriées dans des pays donnés, ou pour des activi-

tés ou des secteurs précis. D'après les études de coûts déjà entreprises en la matière, il semble qu'ils seront relativement faibles au cours des 50 à 100 prochaines années dans la plupart des pays de l'OCDE. Toutefois, il importe évidemment de prendre en compte des horizons temporels plus lointains – de même que les problèmes des pays non membres de l'OCDE, qui seront nombreux à devoir sans doute faire face à des coûts beaucoup plus élevés. En outre, ce n'est pas seulement le changement moyen qui importe, mais aussi la variation autour de cette moyenne – si les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère dépassent un certain seuil, le changement climatique risque d'être brutal et d'influencer profondément l'économie et la société.

Quelle que puisse être l'évolution du climat, il est essentiel que l'adaptation se déroule graduellement, dans toute la mesure du possible. Jusqu'à un certain point, les pays peuvent tirer les enseignements de l'expérience des uns et des autres, étant donné les grandes disparités actuelles des climats. Un certain nombre de pays ont d'ores et déjà acquis une certaine expérience des mesures d'adaptation, surtout peut-être face à l'élévation du niveau de la mer. Dans ce domaine, en raison des externalités, et éventuellement aussi des économies d'échelle dans la collecte d'informations, le secteur public intervient d'ordinaire dans la planification nécessaire à long terme et dans le règlement des différends potentiels entre les divers utilisateurs du sol. Cependant, dans nombre de cas, il faudra moins d'intervention des pouvoirs publics pour faciliter l'adaptation – la politique agricole en constitue un exemple. A ce stade, il est peut-être prématuré de tirer des conclusions fermes sur le type de changement d'orientation qui s'imposera pour faire en sorte que l'adaptation au changement climatique se déroule de façon harmonieuse. En effet, une conclusion générale à propos du changement climatique est que l'on a besoin d'approfondir les connaissances. En particulier, la prise en compte de l'exactitude des prévisions en matière de changement climatique, le rôle de l'incertitude et la valeur à attribuer à la possibilité de catastrophes (ainsi qu'à plusieurs autres aspects liés au changement climatique, tels la disparition des espèces ou d'autres évolutions irréversibles), sont indispensables afin de pouvoir utilement comparer les avantages et les coûts du Protocole de Kyoto et des accords ultérieurs.

2. Le Protocole de Kyoto et le processus du changement climatique

2.1. *Changement climatique*

Depuis que les derniers travaux analytiques approfondis sur le changement climatique ont été présentés au Groupe de travail n° 1 (ils sont résumés dans OCDE, 1995), la question n'a guère perdu de son importance. Les données météorologiques des années 90 ont étayé la thèse selon laquelle le réchauffement planétaire est d'ores et déjà amorcé. Les recherches scientifiques révèlent que cette

tendance corrobore de plus en plus les prévisions des modèles du climat mondial qui intègrent le processus de l'effet de serre (par lequel certains gaz produits par suite des activités humaines – industrie, ménages, transports et agriculture – piègent toujours plus de chaleur dans l'atmosphère terrestre et ajoutent à l'effet de serre « naturel »).

Malgré l'attention considérable accordée à ce problème au cours de la décennie écoulée et les déclarations faisant suite à la Convention-cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC¹) de 1992, certains indices donnent actuellement à penser que les émissions de gaz à effet de serre (GES) augmentent plus rapidement que prévu, que l'objectif initial de la CCNUCC concernant les émissions en l'an 2000 sera loin d'être atteint dans presque tous les pays de l'OCDE et que l'échéance à laquelle on peut envisager une stabilisation des émissions mondiales (et, à plus forte raison, les réductions nécessaires) s'éloigne dans l'avenir.

Des incertitudes subsistent en ce qui concerne l'ampleur précise du réchauffement qu'entraînera l'effet de serre, ses conséquences pour les climats ainsi que ses effets sur les activités et le bien-être de l'humanité. Par ailleurs, une minorité de chercheurs continuent à penser qu'il n'y a pas de réchauffement planétaire en cours, qu'il est, pour une bonne part, indépendant des activités humaines, ou encore qu'il est bénéfique, tout compte fait. Ce sont là cependant des avis très isolés ; le rapport de 1995 du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC²) conclut qu'« un faisceau d'éléments suggère qu'il y a une influence perceptible de l'homme sur le climat global ».

Tel était l'état de la question lorsque les Parties à la CCNUCC se sont réunies lors de la troisième Conférence des Parties (COP3), qui s'est tenue à Kyoto en novembre-décembre 1997. L'aboutissement de cette conférence a été le Protocole de Kyoto, en vertu duquel un certain nombre de pays se sont engagés à atteindre des objectifs déterminés concernant les émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, des détails significatifs et essentiels de plusieurs des dispositions de ce Protocole ont été laissés en suspens, pour être négociés lors des Conférences des Parties ultérieures. Peu de progrès ont été accomplis à cet égard à l'occasion de la COP4, qui a eu lieu à Buenos Aires en novembre 1998, mais un calendrier y a été défini pour parvenir à un accord, et on escompte que les éventuelles questions de mise en œuvre non encore résolues seront réglées à la COP6, prévue pour la fin de l'an 2000. La suite de la présente section fait succinctement le point sur les mécanismes fondamentaux par lesquels on pense que les activités humaines influent sur le climat et les sections suivantes exposent certains des principaux éléments du Protocole de Kyoto.

La relation entre les activités humaines et les émissions de gaz à effet de serre³

Il existe de nombreux gaz à effet de serre (GES), c'est-à-dire des gaz dont la présence dans l'atmosphère absorbe en partie le rayonnement thermique émis par

la Terre. Après la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂) est le gaz à effet de serre de loin le plus important. Le Protocole de Kyoto prend en compte cinq autres gaz ou groupes de gaz : le méthane (CH₄), l'hémioxyde d'azote (N₂O), les hydrocarbures partiellement fluorés, les hydrocarbures perfluorés et l'hexafluorure de soufre⁴. Ces trois derniers gaz n'apparaissent pas spontanément dans la nature, alors que les émissions de CO₂, de CH₄ et de N₂O peuvent être d'origine humaine (« anthropogénique ») ou naturelle⁵. Après le CO₂, le méthane est le plus important des GES anthropogéniques. Les principales sources d'émission de CO₂ sont la combustion de combustibles fossiles et le déboisement ; quant au méthane, les sources d'émission qui jouent un grand rôle sont l'élevage, la production de riz et la production de gaz naturel envoyée dans l'atmosphère. Les composés fluorés présents dans l'atmosphère proviennent essentiellement des fuites qui se produisent dans leur utilisation comme réfrigérants ainsi que pendant la fabrication d'aluminium et de magnésium. Les émissions de chlorofluorocarbones, qui sont aussi des gaz à effet de serre, ont rapidement diminué depuis l'entrée en vigueur du Protocole de Montréal visant leur élimination progressive, et ils ne sont pas couverts par le Protocole de Kyoto.

La relation entre les émissions et les concentrations

En dépit des difficultés à établir un rapport précis entre les émissions et les concentrations, on estime que la proportion résiduelle d'une émission donnée dans l'atmosphère diminue avec le temps, à court ou à moyen terme, suivant une courbe à peu près exponentielle au fur et à mesure que cette émission est absorbée par les différents « puits » – les océans, le sol, les forêts. Les océans absorbent les gaz par dissolution, et également par sédimentation dans les fonds marins ; le taux d'absorption est fortement tributaire de la circulation océanique, qui influe sur la vitesse à laquelle les gaz absorbés par les eaux de surface sont transportés vers les eaux profondes. S'agissant des forêts, on ne pense pas que ce soit un « puits » important lorsqu'elles sont en équilibre, car la quantité de CO₂ qu'elles absorbent par photosynthèse est contrebalancée par la respiration et la décomposition de la végétation. En revanche, pendant qu'elles se développent ou lorsqu'elles sont exploitées de manière durable pour produire du bois, leur rôle en tant que « puits » est considérable. Les sols non plus ne servent pas de « puits » lorsqu'ils se trouvent en équilibre, mais ils peuvent absorber du carbone, par exemple, en cas de changement d'affectation pour revenir à une végétation naturelle après une exploitation agricole (comme il arrive lorsque des terres sont mises en jachère, notamment). Un domaine d'incertitude, pour ce qui a trait aux sols et aux forêts, tient à l'effet de fertilisation par le carbone. On sait que, dans des conditions de laboratoire, la photosynthèse s'accélère – et donc l'absorption de carbone par les plantes, notamment les jeunes arbres – quand la concentration atmosphérique de CO₂ augmente, sous réserve que les plantes ne manquent pas de substances nutritives ou d'eau et que

la température ne dépasse pas un certain seuil (propre à chaque espèce). On ignore jusqu'à quel point ce phénomène se produit dans des conditions naturelles, en particulier pour les arbres parvenus à maturité.

Les différents gaz à effet de serre ne sont pas éliminés de l'atmosphère au même rythme : le méthane disparaît presque totalement en une dizaine d'années (partiellement par transformation en CO₂), tandis que le temps de séjour du dioxyde de carbone peut s'étendre sur 200 ans, et celui de certains hydrocarbures perfluorés sur plusieurs siècles. En principe, il suffit de connaître l'évolution exponentielle des taux de résidus dans l'atmosphère pour prévoir les concentrations sur la base des profils d'évolution des émissions pris pour hypothèse⁶. Établir de pareilles projections est toutefois une tâche très complexe, car il faut tenir compte de ce que l'on connaît des sources et des « puits », ainsi que de la circulation atmosphérique (et, de plus en plus, de la circulation océanique) ; or, la marge d'incertitude est très grande, non seulement en ce qui concerne les mécanismes en jeu, mais aussi la mesure des ordres de grandeur de base⁷.

Les déterminants du changement climatique

Malgré ces incertitudes, les scientifiques semblent s'accorder à reconnaître que les activités humaines ont contribué à une croissance de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère qui va en s'accéléralant et qui a déjà provoqué une hausse des températures moyennes mondiales par rapport aux niveaux qu'elles auraient atteint en l'absence de ce phénomène. Bien que les relevés de températures au cours du siècle écoulé montrent que les moyennes mondiales étaient en baisse pendant certaines périodes (notamment durant deux décennies environ après 1950), il apparaît qu'elles ont effectivement augmenté dans l'ensemble et, depuis peu, plus rapidement peut-être qu'en moyenne sur toute la période considérée ; la fonte des calottes glaciaires et le recul des glaciers tendent à le confirmer.

Les concentrations accrues produisent cet effet car les GES absorbent une partie du rayonnement de grande longueur d'onde émis par la surface de la Terre, réduisant ainsi la proportion qui s'en échappe dans l'espace, ce qui élève la température nécessaire pour maintenir l'équilibre entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement solaire incident ; si les températures étaient égales (ou inférieures) à ce niveau d'équilibre dans le passé récent, on peut prévoir qu'elles augmenteront.

L'interprétation des conséquences des variations des températures sur le climat lui-même soulève d'autres incertitudes. En général, une augmentation des températures moyennes devrait intensifier le cycle de l'eau – il pleuvra davantage. Il est cependant peu probable que ces précipitations accrues soient également réparties ; les fortes pluies peuvent devenir plus fréquentes en certains endroits et les sécheresses dans d'autres. En outre, selon toute vraisemblance, le niveau moyen de la mer s'élèvera.

Un facteur primordial qui détermine toutes les caractéristiques du climat est le transfert de chaleur des régions équatoriales vers les pôles. Des températures globalement plus élevées modifieront sans doute les circulations atmosphérique et océanique qui y sont associées. Or, on connaît relativement peu de détails, pour l'heure, sur la façon dont ces mécanismes agissent – en particulier la circulation océanique – et sur leur interaction avec les propriétés de la surface terrestre, de sorte que l'on ne dispose pas de prévisions précises en la matière. Même si les concentrations de gaz à effet de serre sont stabilisées à bref délai (ce qui semble improbable), la plupart des projections indiquent que le changement climatique se poursuivra pendant un certain temps. Compte tenu de la lente adaptation vers l'«équilibre», on peut difficilement parler des propriétés du «nouveau» climat associé à une concentration donnée, puisqu'il sera en évolution constante. Il faut donc envisager un horizon très lointain pour brosser un panorama complet des incidences des changements – qui pourraient, dans une région donnée, s'avérer soit bénéfiques soit néfastes.

2.2. Principaux éléments du Protocole de Kyoto

Le Protocole limite les émissions d'un groupe de pays, appelés «pays de l'Annexe I» (figurant sur la liste initiale de l'Annexe I à la CCNUCC, à laquelle d'autres pays ont été ajoutés depuis)⁸, dont font actuellement partie tous les pays de l'OCDE (à l'exception du Mexique) et un certain nombre d'économies en transition⁹. Par rapport à leurs émissions de 1990, les pays de l'Annexe I se sont engagés à réduire leurs émissions totales de GES (exprimées en tonnes d'équivalent carbone¹⁰) de quelque 5 pour cent en moyenne dans la période comprise entre 2008 et 2012. On observe certaines différences entre pays de l'Annexe I dans les objectifs de réduction des émissions. Celles-ci vont de 6 pour cent pour le Japon, le Canada, la Hongrie et la Pologne à 8 pour cent pour certains États membres de l'Union européenne et quelques pays d'Europe orientale. La Fédération de Russie et l'Ukraine, ainsi que la Nouvelle-Zélande, se sont engagées à ne pas dépasser leurs niveaux d'émission de 1990. Certains pays sont même autorisés à accroître leurs émissions par rapport aux niveaux de 1990¹¹.

Le Protocole de Kyoto marque un recul par rapport à l'un des principaux objectifs initiaux de la CCNUCC – selon lequel les pays industrialisés limiteraient leurs émissions de gaz à effet de serre en l'an 2000 à un niveau égal ou inférieur à celui de 1990. L'objectif de Kyoto est plus strict que ce niveau d'émission, mais l'échéance est reportée d'une décennie : ainsi qu'il a été mentionné plus haut, les engagements chiffrés concernent la moyenne des années 2008-12. La tâche apparaît maintenant plus lourde pour la plupart des pays car les émissions ont augmenté depuis 1990. S'agissant de l'OCDE, seuls quelques pays (le Royaume-Uni, l'Allemagne, la Suisse et le Luxembourg) atteindront l'objectif initial en l'an 2000 ; selon la plupart des

prévisions, pour réaliser les objectifs de Kyoto, les différents pays devront prendre de nouvelles mesures ou recourir aux mécanismes de flexibilité.

Les mécanismes de flexibilité

Agir exclusivement à l'échelon national pour atteindre les différents objectifs chiffrés est une stratégie relativement coûteuse pour réduire les émissions, car les coûts marginaux des réductions peuvent varier d'un pays à l'autre, dès lors que certains doivent prendre des mesures de réduction onéreuses tandis que d'autres ne tirent pas pleinement parti des mesures à faible coût. Les mécanismes dits de flexibilité du Protocole de Kyoto permettent d'aligner les coûts marginaux en offrant des moyens d'imputer des réductions des émissions obtenues dans un pays au décompte de l'objectif d'un autre pays¹². Ces mécanismes sont au nombre de trois : les échanges de droits d'émission, la « Mise en Œuvre Conjointe » et le « Mécanisme pour un Développement Propre »¹³. Comme pour d'autres aspects du Protocole, le texte ne décrit pas précisément les modalités de mise en œuvre. Il est prévu que les règles et procédures correspondantes seront élaborées lors des futures réunions de la Conférence des Parties (et de ses « organes subsidiaires ») ; il a été décidé, à l'occasion de la COP4, de les mettre définitivement au point à la COP6, à la fin de l'an 2000¹⁴.

- Échanges de droits d'émission

Il est déclaré, à l'Article 17 du Protocole de Kyoto, que les pays « peuvent participer à des échanges de droits d'émission aux fins de remplir leurs engagements [objectifs d'émission pour 2008-12]... » Le but recherché est de permettre aux pays de l'Annexe 1 qui sont en mesure de respecter sans trop de difficultés leurs objectifs de Kyoto de dépasser les réductions chiffrées effectivement requises et de vendre les excédents sous forme de « permis » aux pays où les coûts de la lutte contre ces émissions sont plus élevés¹⁵.

L'article correspondant du Protocole indique que l'échange de droits d'émission doit venir « en complément » des mesures prises au niveau national en vue de réduire les émissions, pour tenir compte du souhait de certains participants de s'assurer que tous les pays prendront des mesures domestiques pour diminuer les émissions nationales et ne s'en remettront pas exclusivement à l'achat du « droit à polluer ». Mais il ne s'est pas dégagé de consensus sur ce que cela signifiera dans la pratique. Cet aspect des échanges de droits d'émission, ainsi que d'autres, sont repris de façon plus détaillée ci-après.

- « Mise en Œuvre Conjointe » et « Mécanisme pour un Développement Propre »

Le mécanisme de « Mise en Œuvre Conjointe » (Article 6 du Protocole de Kyoto) permet à un pays de l'Annexe 1 de financer un projet de réduction des

émissions¹⁶ dans un autre pays de l'Annexe 1 et d'acquérir ainsi un crédit de réduction des émissions, ou une fraction de crédit, comme si la réduction avait été réalisée chez lui, la quantité correspondante étant alors déduite du niveau d'émissions autorisé du pays hôte. La grande différence, par rapport à l'échange direct de permis d'émission, tient à la nécessité d'évaluer les émissions qui auraient été rejetées si le projet n'avait pas été mis en œuvre ; la COP6 devra préciser les méthodes à utiliser pour la définition de ces niveaux de référence. La COP1 (1995) prévoyait un mécanisme d'« activités exécutées conjointement » et un certain nombre de projets pilotes sont déjà en cours ou prévus selon cette formule¹⁷.

Le « Mécanisme pour un Développement Propre » (Article 12 du Protocole) présente des similarités avec la « Mise en Œuvre Conjointe », sauf en ce qui concerne le pays hôte – différence importante –, qui ne doit pas figurer à l'Annexe 1¹⁸. Cette différence peut avoir des conséquences notables. Avec la « Mise en Œuvre Conjointe », toute erreur de niveau de référence en faveur du pays hôte ou du pays initiateur du projet est automatiquement équilibrée si l'on considère les émissions mondiales, étant donné que les deux pays sont assujettis à des plafonds d'émission (à condition que ces limites soient respectées). Dans le cas du « Mécanisme pour un Développement Propre », les erreurs de calcul des niveaux de référence peuvent entraîner des émissions mondiales supérieures au niveau qu'elles auraient atteint si le projet n'avait pas été mis en œuvre car on n'a pas fixé, au départ, de plafonds d'émission pour les pays hors Annexe 1. Des erreurs pourraient aussi produire l'effet inverse, c'est-à-dire des émissions mondiales inférieures, mais les deux parties auront intérêt à exagérer la réduction des émissions imputable au projet en gonflant les projections de référence. Pour prendre en compte ces motivations différentes, le Protocole de Kyoto prévoit de créer un conseil qui sera chargé de superviser le fonctionnement du « Mécanisme pour un Développement Propre » ; en revanche, pour qu'un projet de « Mise en Œuvre Conjointe » soit accepté, il faut essentiellement l'accord des deux pays concernés.

La « Mise en Œuvre Conjointe » et le « Mécanisme pour un Développement Propre » sont semblables aux échanges de droits d'émission en ce qu'ils visent à réduire les émissions là où les mesures à prendre sont peu onéreuses, mais ils en diffèrent sur certains points importants aussi. Étant fondés sur des projets, ces deux mécanismes sont de nature à favoriser l'investissement et à promouvoir le transfert de technologie, alors que les échanges n'impliquent que des transactions au comptant. Les coûts de transaction liés à la « Mise en Œuvre Conjointe » et au « Mécanisme pour un Développement Propre » seront sans doute assez élevés, puisque les pays concernés, et éventuellement un conseil international également, devront calculer les niveaux de référence et approuver les projets au cas par cas. Diverses méthodes sont à l'étude pour résoudre le problème de la fixation des niveaux de référence¹⁹.

¹⁹ 20

Les réductions certifiées des émissions obtenues dans le cadre de projets couverts par le « Mécanisme pour un Développement Propre » entre 2000 et 2008 « peuvent être utilisées pour aider à respecter les engagements prévus pour cette période » (citation de l'Article 12). Cette disposition pourrait jouer un rôle important, dans la mesure où elle incite à réduire les émissions mondiales avant la première période d'engagement (2008-2012). Le Protocole exige aussi implicitement que la réduction des émissions soit durable, mais il n'est pas précisé pendant combien d'années la valeur des réductions peut être mise au crédit de la partie qui a lancé le projet. Il reste à définir plus précisément cet aspect, parmi d'autres, du « Mécanisme pour un Développement Propre ».

Le « Mécanisme pour un Développement Propre » peut avoir des répercussions sur les échanges de droits d'émission, ce qui aura des conséquences pour la répartition des émissions mondiales. Bien que les pays non visés à l'Annexe 1 rejettent peu d'émissions par habitant, leurs émissions par unité de PIB sont généralement considérables, et le coût de la réduction de leur intensité d'émission est faible (en comparaison de celui de la plupart des pays de l'OCDE). La facilité avec laquelle on pourra approuver et exécuter les projets couverts par le « Mécanisme pour un Développement Propre » sera déterminante, du point de vue de son influence sur les échanges de droits d'émission entre pays de l'Annexe 1 : si le « Mécanisme pour un Développement Propre » ne suscitait guère de désaccords, le faible coût des réductions d'émissions dans les pays non visés à l'Annexe 1 pourrait fortement limiter la hausse du prix des permis et, par contrecoup, les réductions effectives des émissions dans les pays de l'Annexe 1 seraient relativement faibles (sous réserve des contraintes de complémentarité dont il est question ci-dessous).

- Autres aspects des dispositions de flexibilité

Complémentarité

Tous les pays signataires du Protocole de Kyoto ne voient pas de la même façon les instruments dits de « flexibilité ». Le texte du Protocole reflète un certain désaccord entre deux points de vue : i) l'idée que les émissions devraient être réduites dans les pays où elles sont déjà très élevées par habitant et ii) l'idée qu'il faudrait les réduire au moindre coût économique. Les possibilités de flexibilité découlent de ce second point de vue, alors que le premier semble avoir conduit à introduire la notion de « complémentarité ».

Chacun des articles qui définissent les échanges de droits d'émission et la « Mise en Œuvre Conjointe » exprime, sous une forme ou une autre, la condition de complémentarité²⁰. Les échanges de droits d'émission, par exemple, sont censés venir en complément des mesures prises à l'échelon national pour respecter les

objectifs de Kyoto. Dans le sens le plus strict, cela pourrait vouloir dire que les mesures prises au niveau national devraient presque suffire pour atteindre les objectifs visés avant qu'aucun échange ne soit autorisé, auquel cas l'échange ne serait pas seulement complémentaire, mais aussi, en grande partie, inutile ; dans le sens le plus large, on pourrait l'interpréter comme ne prescrivant que des mesures minimales à l'échelon national. Il a été proposé, sur la base de cette disposition, que les échanges se limitent, par exemple, à une proportion donnée du total des permis d'émission²¹.

« Air chaud »

Après la signature du Protocole, il s'est engagé un débat sur ce que l'on a désigné par le terme d'« air chaud ». Il s'agit de la possibilité, pour certains pays de l'Annexe 1, notamment quelques économies en transition, de respecter les objectifs de Kyoto sans prendre aucune mesure au niveau national. Dans ce cas, ils pourraient vendre leurs permis excédentaires (l'« air chaud ») sans engager aucune dépense pour réduire les émissions. Les prévisions quantitatives concernant cet « air chaud » sont très tributaires des prévisions de production dans l'ex-Union soviétique, en particulier la Russie et l'Ukraine. Les perspectives économiques actuelles de ces pays donnent à penser que les quantités d'« air chaud » peuvent se révéler considérables. Cependant, ce sera vraisemblablement un phénomène de courte durée, qui ne persistera pas pendant les périodes d'engagement ultérieures. Le chapitre 3 examine les incidences de l'« air chaud » et des éventuelles restrictions des échanges le concernant sur les coûts globaux de la lutte contre les émissions.

« Mise en réserve »

L'Article 3 du Protocole prévoit également la possibilité de reporter à des périodes d'engagement futures les permis non utilisés. En général, ce ne sera sans doute pas une politique délibérée, étant donné la préférence intertemporelle et la perspective d'une diminution progressive des coûts de la lutte contre les émissions. La disposition concernant la « mise en réserve » de permis d'émissions s'applique en ce qui concerne l'« air chaud », puisque les pays qui ne seraient pas autorisés à en vendre pourraient automatiquement mettre en réserve ces droits d'émission pour les utiliser ultérieurement. L'interdiction de procéder à des échanges d'« air chaud » ne permettrait nullement, en l'occurrence, de réduire les émissions cumulées, elle ne ferait que différer quelque peu les échéances – à condition que les quantités attribuées pour les périodes d'engagement futures ne soient pas modifiées par les niveaux d'émissions effectifs, ce qui pourrait bien arriver en réalité, vu que les négociations se déroulent selon un processus séquentiel.

22

Substitution entre gaz à effet de serre

Les objectifs de Kyoto concernent plusieurs GES pris dans leur ensemble. Ils sont exprimés en termes d'équivalent CO₂, les coefficients de conversion des différents gaz étant déterminés par leur pouvoir relatif à induire l'effet de serre (« potentiel de réchauffement global »)²². Il en résulte une plus grande flexibilité en ce sens que les pays ont une plus grande latitude de choix entre les stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre en ne limitant pas cette réduction au CO₂ (sous réserve que leurs niveaux de référence pour les émissions des autres gaz soient significatifs). En conséquence, une proportion importante de la diminution nécessaire pourrait concerner des gaz autres que le CO₂, ce qui serait moins coûteux que s'il fallait atteindre les objectifs de Kyoto en réduisant les émissions de CO₂ exclusivement²³. Toutefois, la mesure des émissions de gaz autres que le CO₂ comporte plus d'incertitude que pour le CO₂, et certains pensent que les problèmes de mesure apportent une justification supplémentaire aux limites imposées à la proportion de l'engagement qu'un pays peut remplir par le biais des échanges de droits d'émission (voir ci-après).

« Puits »

En plus d'élargir le champ couvert par les objectifs d'émission pour y inclure des gaz autres que le CO₂, le Protocole de Kyoto prend en compte également les « puits ». Il s'agit de phénomènes pour une bonne part naturels – que l'on ne cerne pas encore complètement, dans nombre de cas – et dont la composante anthropogénique tient généralement à des changements à grande échelle d'affectation des terres. Le Protocole prévoit de considérer les variations des absorptions des gaz à effet de serre par les « puits », quand il est certifié qu'elles résultent directement des activités humaines entreprises après 1990, comme étant des crédits valables pendant la première période d'engagement. La reforestation est la principale mesure qui peut être prise dans ce cadre. Dans certains pays, elle donne déjà lieu à des renforcements notables de l'absorption du CO₂, qui auront toutefois relativement peu d'importance au départ, car ils sont généralement le résultat de mesures prises avant 1990. Par ailleurs, comme le potentiel de séquestration du carbone dans les forêts est assez bas au début de leur croissance et qu'il augmente par la suite (jusqu'à un certain point, comme on l'a dit plus haut) au fur et à mesure de leur développement, le rôle des « puits » peut acquérir plus de poids dans les futures périodes d'engagement.

2.3. Questions liées à la mise en œuvre du Protocole

Parmi les mécanismes de flexibilité, les échanges de permis d'émission ont particulièrement retenu l'attention. On a déjà évoqué, au chapitre 2, le fait que le commerce de permis pourrait sensiblement réduire les coûts économiques de la

réalisation des objectifs de Kyoto. Cependant, bien que la notion d'échange de droits d'émission soit relativement simple en théorie, il reste beaucoup de questions sans réponse quand on envisage de mettre en pratique un système de ce type. En particulier, il y a des divergences de vues sur la façon d'en vérifier la conformité et d'en assurer le respect, ainsi que sur les parties qui seraient autorisées à procéder à ces échanges. Cette publication n'entend pas recommander un agencement approprié du système d'échanges²⁴, mais cette section met en relief, à partir des travaux menés surtout dans le cadre du Groupe d'experts de l'Annexe I, un certain nombre de questions qui pourraient avoir une influence sur ces échanges et sur les finalités générales du Protocole de Kyoto. En élucidant rapidement ces questions, on contribuera à la mise en œuvre du Protocole d'une manière efficace par rapport aux coûts, grâce à la création d'un cadre crédible et prévisible qui permettra au secteur privé de prendre des décisions dans une optique prospective.

Moyens d'assurer le respect des objectifs

Lorsqu'il sera en vigueur, le Protocole de Kyoto aura valeur de traité et les gouvernements seront tenus de veiller à son application. Cela dit, l'élaboration des mesures à prendre en cas de non-respect fait partie du mandat de la COP6, et elle est importante, en particulier, parce que le respect des engagements et l'échange de permis d'émission sont interdépendants : si la mise en conformité n'est pas contraignante, il n'y a pas d'incitation à acheter des permis ; dans le même temps, certains font valoir que le régime d'échanges de droits d'émission devrait être agencé de manière à encourager le respect du Protocole²⁵. Aux États-Unis, le système de permis négociables d'émissions de dioxyde de soufre, qui sert souvent de modèle dans les débats sur les échanges de permis d'émission, traite le problème du respect des obligations en imposant une sanction externe crédible, sous forme de pénalités largement supérieures au coût marginal de la réduction des émissions²⁶. En principe, les pays qui dépasseraient leurs plafonds autorisés d'émission de GES pourraient être passibles de sanctions externes au niveau international, et il a parfois été question d'utiliser comme instrument à cet effet des sanctions de politique commerciale, au lieu de pénalités financières (encore que la compatibilité de ces sanctions avec les règles de l'OMC pose un problème). Cependant, il est peu vraisemblable qu'il se dégage un consensus politique à cet égard, du moins en l'état actuel des choses.

Le système d'échanges de droits d'émission pourrait être utilisé afin de renforcer le respect des obligations en pénalisant un pays qui ne tiendrait pas ses engagements par une suspension de son droit d'échanger des permis. A première vue, l'efficacité de cette sanction peut sembler limitée : si un pays vend beaucoup de permis et que l'on constate ultérieurement qu'il rejette plus d'émissions qu'il n'y est autorisé, retirer le droit de vendre des permis ayant déjà été vendus n'est

²⁴

pas une sanction lourde. Cependant, compte tenu du caractère récurrent de ce processus, l'impossibilité de vendre des permis à l'avenir peut en fait, dans certains cas, représenter une très forte pénalité – essentiellement pour les pays où les coûts de réduction des émissions sont très inférieurs à la moyenne et qui peuvent normalement s'attendre à être vendeurs. Pour les pays qui seront probablement des acheteurs nets de permis, la suspension du droit d'en acheter pourrait être une sanction difficile à appliquer en cas de non-respect : au moment où la non-conformité pour la première période d'engagement pourra être établie (sans doute à la fin 2013 au plus tôt), l'achat de permis sera le seul moyen pour ces pays de remplir leurs obligations. En ce cas, le caractère récurrent du processus n'est pas d'un grand secours : si un pays faillit délibérément à son engagement, l'empêcher d'acheter des permis ultérieurement risque d'avoir peut d'effet sur lui, mais le prix des permis baisserait pour les vendeurs et cela ferait augmenter les émissions mondiales. En outre, des pays seraient tentés de manipuler la mesure des émissions (puisque les inventaires des émissions seront communiqués par les pays eux-mêmes, puis examinés par des instances d'expertise scientifique mises en place par la CCNUCC). En général, le respect des obligations dépendra beaucoup plus de la volonté des différents pays de tenir leurs engagements en vertu du traité que des menaces de sanction²⁷.

Responsabilité de l'acheteur ou du vendeur initial dans un échange de permis

Les incitations à respecter les engagements pris entrent aussi en ligne de compte dans les débats sur la responsabilité de l'acheteur ou du vendeur initial d'un permis. L'exemple suivant met en lumière le problème : le pays A a vendu des permis au pays B. Lequel des deux sera tenu pour responsable si, à la fin de la période d'engagement, on constate que le pays A a rejeté plus d'émissions que son quota de permis (déduction faite de ceux qu'il a vendus), mais moins que son allocation initiale²⁸ ? Même dans les cas où il est impossible d'appliquer des sanctions, ou lorsqu'elles ne sont pas crédibles, les règles concernant la responsabilité peuvent avoir une influence sur les motivations qu'auront les différents pays en la matière. Si la responsabilité revient au vendeur initial²⁹, tous les permis vendus le sont irrévocablement – dans cet exemple, le pays B n'a rien à craindre. Dans le texte du Protocole, il est établi que la responsabilité incombe aux vendeurs, de s'assurer qu'ils ne dépassent pas leurs plafonds d'émission après en avoir soustrait les quantités vendues. En revanche, si la responsabilité est attribuée à l'acheteur, les permis (ou une fraction des permis) achetés par le pays B pourraient être invalidés et celui-ci serait tenu pour défaillant (sous réserve que le pays B ait eu vraiment besoin des permis achetés au pays A pour remplir ses obligations).

Dès lors, on estime qu'en modifiant le Protocole pour faire porter la responsabilité à l'acheteur, il y aurait moins de probabilités que surviennent des cas de non-respect de ce type, étant donné que le prix des permis cédés par des pays suscep-

tibles de ne pas tenir leurs engagements serait faible, car il y a un risque que ces permis deviennent inutilisables. En conséquence, les pays souhaitant vendre des permis seraient encouragés à respecter leurs obligations pour accroître leurs recettes, qu'ils attachent ou non un prix à l'engagement lui-même. Cela présuppose que l'on puisse disposer assez aisément d'informations sur les cas concevables de non-respect³⁰. En fait, les informations seront très rares au début, ce qui risque de dissuader complètement les pays de procéder à des échanges avant d'avoir fait un bilan – ce qui demandera un certain temps. Tant que les marchés ne seront pas bien établis, si la responsabilité incombe à l'acheteur, il y aura une plus grande probabilité de segmentation du marché, et le commerce de permis serait alors moins efficace pour réduire les coûts globaux de la lutte contre les émissions.

Il peut également se révéler irréaliste de faire porter la responsabilité à l'acheteur si les pays souhaitent associer des systèmes nationaux de plafonnement des échanges à un système international de commerce de permis d'émission, avec des pénalités à l'échelon national en cas de non-respect. Supposons, par exemple, qu'une entreprise américaine achète des permis russes et prévoie les émissions sur cette base, et que ces permis soient invalidés quelques années plus tard pour cause d'émissions excessives en Russie. Si la responsabilité incombe à l'acheteur, l'entreprise américaine se retrouve alors en situation de non-conformité et les autorités des États-Unis doivent lui infliger une sanction en conséquence. En théorie, cela ne devrait pas poser de problème, vu que l'entreprise américaine aurait dû prendre en compte la probabilité d'invalidation des permis et prévoir ses émissions compte tenu d'une amende éventuelle. Toutefois, dans la pratique, cela pourrait être politiquement inacceptable et entraînerait sans doute de multiples litiges. En tout état de cause, les dispositions relatives à la responsabilité de l'acheteur ou du vendeur initial³¹ favoriseront un plus grand respect en fonction de la rigueur avec laquelle les différentes Parties considéreront leurs engagements de Kyoto³².

Entités éligibles pour les échanges de permis

De même que les échanges internationaux de droits d'émission devraient permettre de déplacer les réductions d'émissions de gaz à effet de serre vers les pays où elles sont moins coûteuses, les systèmes nationaux d'échange de permis d'émission contribueraient à abaisser les coûts moyens de réduction à l'échelle nationale. A cet effet, il faudrait que les gouvernements allouent une partie des quotas nationaux de permis, ou des quantités attribuées, à des installations, à des entreprises ou à d'autres entités. Si ces systèmes nationaux étaient liés au système international, le nombre d'acteurs économiques opérant sur le marché mondial augmenterait et, de ce fait, le pouvoir de marché aurait tendance à diminuer, ce qui améliorerait l'efficacité globale des échanges (se reporter au chapitre 3, où sont analysés les effets du pouvoir de marché).

Un système national d'échanges couvrant toutes les émissions de gaz à effet de serre serait inapplicable, en particulier pour les gaz dont les sources d'émission ne sont pas fixes (notamment le méthane, mais peut-être aussi le CO₂ rejeté par le secteur des ménages), en ce sens que leur surveillance est impossible et qu'il n'existe pas de rapport constant entre ces émissions et les quantités mesurées des consommations ou productions correspondantes. Il faudrait donc nécessairement recourir à un assortiment de mesures, conçu en veillant à ce que les gains d'efficacité ne soient pas compromis en pénalisant ou favorisant indûment des catégories particulières d'émissions.

Le Protocole de Kyoto ne fait pas expressément allusion aux échanges entre entités (bien qu'il mentionne des entités juridiques ou des entités privées dans le cadre de la « Mise en Œuvre Conjointe » ou du « Mécanisme pour un Développement Propre »). Cependant, même si les dispositions du Protocole allaient à l'encontre des échanges entre entités, il serait relativement simple d'articuler un marché national avec un marché international : le gouvernement pourrait réglementer l'octroi de permis nationaux en fonction de ses propres dotations en permis internationaux, en opérant sur les marchés national et international afin de maintenir l'équilibre des prix³³. Si des entités qui ne rejettent pas d'émissions elles-mêmes étaient autorisées à intervenir dans ces échanges, il pourrait apparaître des courtiers sur ce marché, ce qui améliorerait son fonctionnement.

Surveillance et vérification

Un autre problème de mise en œuvre, dont les conséquences se feront sentir dans de nombreux domaines, au-delà de celui des échanges de droits d'émission, est l'incertitude inhérente à la mesure des volumes d'émission. Il ne se pose pas de la même façon pour les différents gaz. La mesure des émissions anthropogéniques de CO₂ est jugée relativement précise, car elles proviennent surtout de la combustion des combustibles fossiles et de la biomasse. La production de CO₂ qui en résulte est proportionnelle à la teneur en carbone (que l'on connaît) de chaque combustible et elle ne varie pas beaucoup en fonction de la technologie utilisée pour la combustion³⁴. Si l'on peut chiffrer la consommation de ces combustibles, on peut aussi évaluer les émissions.

Les émissions des autres gaz à effet de serre sont surtout liées aux procédés industriels (ou à l'agriculture et l'élimination des déchets dans le cas du méthane) ou à des fuites provenant d'appareils ménagers pendant leur utilisation ou lorsqu'ils sont mis au rebut. Les taux d'émission varient, et dans des proportions considérables, selon la technologie utilisée. Dans les estimations actuelles des émissions de ces gaz, les marges d'erreur sont beaucoup plus grandes que pour le CO₂. Pour certains hydrocarbures partiellement fluorés et le SF₆, elles peuvent atteindre des facteurs compris entre 2 et 5 ; les marges d'erreur

sont plus faibles pour le méthane (+/-25 pour cent, soit un facteur de 1.25) et l'hémioxyde d'azote (facteur de 2), mais elles sont tout de même non négligeables (Gielen et Kram, 1998).

Un autre domaine dans lequel les évaluations sont entachées d'incertitudes considérables est celui des « puits ». A la COP4, il a été convenu que l'ajustement des quantités attribuées à une Partie doit être égal aux variations vérifiables des stocks de carbone au cours de la période 2008-12 découlant directement d'activités humaines de boisement, de reboisement et de déboisement mises en œuvre depuis le 1^{er} janvier 1990. Une solution serait d'essayer de mesurer directement les absorptions par les « puits », mais il y a un risque d'erreurs d'échantillonnage ; sinon, il faudra estimer ces variations à partir des données concernant les activités de boisement et des estimations des taux d'absorption de chaque type de boisement.

Dans le cadre de la CCNUCC, il est généralement admis d'employer les méthodologies de base « par défaut » pour l'estimation des émissions, les pays étant encouragés à utiliser les meilleures d'entre elles lorsqu'ils en ont la possibilité. L'exactitude des mesures devrait s'améliorer régulièrement à la faveur de la procédure des « communications nationales » (où figurent les estimations des émissions) et des examens par des équipes d'experts (bien que ces derniers ne vérifient pas directement l'exactitude des chiffres communiqués sur les émissions). Si les méthodologies manquent de précision mais ne sont pas biaisées, les résultats ne seront pas systématiquement excessifs, à moins que la procédure de vérification soit insuffisante pour déceler une éventuelle « tromperie ». L'incitation à fausser les chiffres dépendra de plus en plus de la sanction en cas de non-respect et du coût marginal de la réduction des émissions. Cependant, d'autres facteurs auront peut-être aussi de l'importance – notamment, la capacité de respecter les engagements. Selon certains, l'inexactitude des mesures justifie que l'on restreigne les échanges de permis afin d'éviter des émissions excessives, ou que l'on limite la participation aux échanges aux seuls pays disposant de données fiables sur les émissions – à l'échelon national et au niveau des entités susceptibles d'intervenir dans ce commerce.

3. Répercussions du Protocole de Kyoto

Ce chapitre porte sur les coûts macroéconomiques de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto. Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre précédent, le Protocole tel qu'il se présente laisse de nombreuses questions en suspens. En l'absence de précisions sur ses futures modalités de mise en œuvre concrète, il convient de faire preuve de prudence dans l'évaluation de son impact économique. Cependant, chiffrer ses effets sur la base de différentes hypothèses permettra peut-être d'éva-

luer la contribution des diverses dispositions – notamment les « mécanismes de flexibilité » – à une mise en œuvre efficace du point de vue des coûts.

Ce chapitre met l'accent sur les implications du Protocole à court terme, c'est-à-dire jusqu'à la fin de la première période d'engagement (2008-12). Il s'appuie sur les résultats d'une série de modèles économétriques qui, tous, se fondent sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (en particulier, les gaz à effets de serre autres que le CO₂ ne sont pas pris en compte). Parmi les résultats pris en considération figurent ceux du modèle d'équilibre général mondial GREEN, de l'OCDE (voir l'encadré 1)³⁵. Le premier objectif est d'identifier les coûts économiques qui découlent du Protocole lorsque les pays ou régions se conforment individuellement à leurs engagements de réduction des émissions (donc sans faire appel aux « mécanismes de flexibilité »). Vient ensuite une analyse des répercussions du Protocole lorsque les « mécanismes de flexibilité » sont mis en œuvre. Dans la mesure où il n'est pas possible de déterminer dans quelle mesure ces mécanismes seront utilisés, la démarche s'appuie sur une analyse de sensibilité. Les implications du Protocole concernant la période ultérieure à 2008-12, y compris ses répercussions sur la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, sont abordées dans le chapitre 4.

3.1. Coûts économiques des engagements de Kyoto : mise en œuvre sans les mécanismes de flexibilité

Aux fins d'analyse des répercussions économiques du Protocole de Kyoto, il convient en premier lieu d'envisager le cas où les Parties visées à l'Annexe I remplissent leurs engagements individuellement. En effet, partir d'un scénario où les mécanismes de flexibilité ne jouent aucun rôle est utile à plus d'un titre³⁶ : premièrement, on ignore dans quelle proportion ces mécanismes pourront être effectivement utilisés ; deuxièmement, les informations sur certains aspects techniques essentiels de ces mécanismes et sur d'autres aspects de la flexibilité prévue par le Protocole demeurent pour l'instant lacunaires (en ce qui concerne, entre autres, le potentiel d'absorption lié au renforcement des « puits », sa mesure et ses coûts, ou la réduction des émissions des gaz autres que le CO₂) ; troisièmement, ce type de scénario fournit une estimation du niveau maximal des coûts induits par l'application du Protocole de Kyoto et peut ensuite servir de référence pour déterminer dans quelle mesure les mécanismes de flexibilité permettraient de réduire ces coûts.

Dans tous les cas, les estimations chiffrées analysées ici portent uniquement sur la réduction des émissions de CO₂ (aucun des modèles cités plus haut ne prend en considération les autres gaz à effet de serre). Par conséquent, si la limitation des émissions d'autres gaz se révélait moins onéreuse, les coûts de mise en œuvre du Protocole, tels que calculés dans les simulations effectuées, pourraient être considérés comme surévalués. Cela étant, il y a aussi des raisons de penser que ces

Encadré 1. Le modèle GREEN de l'OCDE

Les scénarios chiffrés commentés dans cette publication ont été élaborés à l'aide du modèle GREEN du Secrétariat de l'OCDE. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général appliqué dynamique multirégional et multisectoriel, développé avec l'objectif explicite de chiffrer les coûts, à l'échelle du monde et de l'économie dans son ensemble, des politiques de réduction des émissions de CO₂. S'agissant des problèmes liés à ce gaz, le modèle porte sur le moyen terme : les simulations couvrent la période allant jusqu'à 2050.

Compte tenu de la dimension mondiale du problème des gaz à effet de serre, une attention particulière est accordée à la modélisation de certaines régions essentielles en dehors de l'OCDE. Douze sous-modèles régionaux détaillés sont identifiés :

- quatre régions de l'OCDE (États-Unis, Japon, Union européenne et autres pays Membres de l'OCDE) ;
- huit régions hors OCDE (CEI, Europe orientale, Chine, Inde, pays en développement exportateurs d'énergie, économies dynamiques d'Asie, Brésil et un groupe « reste du monde »).

Le modèle GREEN a une structure dynamique récursive simple, dans laquelle les décisions d'épargne affectent les résultats économiques futurs par le biais de l'accumulation du capital productif. Dans la version utilisée ici, la modélisation de l'accumulation de capital obéit à un schéma putty/semi-putty. Les rendements d'échelle des différents secteurs de production sont constants et les marchés sont supposés parfaitement concurrentiels. La production et la consommation sont déterminées à l'aide de systèmes de fonctions à élasticité de substitution constante emboîtées (CES). L'optimisation de l'utilité par les consommateurs et la répartition de leurs dépenses de consommation sont déterminées sur la base d'un système linéaire de dépenses généralisé (ELES).

Onze secteurs de production sont définis dans le modèle GREEN. Ils ont été choisis pour mettre en lumière les interactions entre l'épuisement des ressources, la production d'énergie, la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. La principale source d'émissions anthropogénique de ce gaz étant la consommation des combustibles fossiles, l'accent est mis sur le secteur de l'énergie. Trois sources conventionnelles d'énergie fossile (pétrole, gaz naturel et charbon) et une source conventionnelle d'énergie non fossile (dite « sans carbone ») sont distinguées. La source d'énergie sans carbone regroupe l'hydroélectricité et l'électricité d'origine nucléaire et solaire. Toutes les sources d'énergie conventionnelles peuvent être remplacées par des technologies alternatives avec ou sans carbone, pour un coût et à partir de dates exogènes.

Le bloc de production de chaque sous-modèle régional décrit en détail l'offre de combustibles fossiles et la consommation d'intrants énergétiques fossiles et non fossiles dans le processus productif. De plus, on tient compte des changements dans la structure de la production en traitant l'agriculture séparément et en distinguant deux autres grands secteurs, à savoir les industries à forte intensité énergétique et les autres industries et services.

Encadré 1. **Le modèle GREEN de l'OCDE** (suite)

La demande des consommateurs est ventilée entre quatre grands agrégats : alimentation et boissons, combustibles et électricité, transports et communications, et autres biens et services. L'épargne est implicitement assimilée à un « cinquième bien » et les fluctuations des prix de l'énergie affectent donc à la fois la structure de la demande de consommation et le couple consommation/épargne par le biais des variations du revenu réel.

La version du modèle utilisée ici (voir Burniaux et Complainville, 1999) a été mise à jour et légèrement modifiée par rapport à celle qui avait été employée dans le projet de l'OCDE de comparaison des modèles (voir Burniaux *et al.*, 1992, et Lee, Oliveira-Martins et van der Mensbrugghe, 1994). Elle s'appuie sur des données de 1995 élaborées dans le cadre du Global Trade Analysis Project (GTAP) (Hertel, 1997).

coûts sont sous-estimés, en particulier parce que les coûts d'ajustement ne sont pas pleinement pris en compte (voir ci-après l'encadré 3). Les impacts calculés par les simulations s'inscrivent dans une fourchette relativement étendue, ce qui n'est pas surprenant compte tenu des structures différentes que présentent les modèles et des hypothèses variées sur lesquelles ils se fondent. En outre, telles qu'elles sont simulées, les conséquences des mesures prises pour atteindre les objectifs du Protocole dépendent des profils d'émissions en l'absence de ces mesures. Les scénarios dits « de référence », c'est-à-dire ceux qui décrivent l'évolution de la situation en l'absence de mesures, varient d'une étude à l'autre (celui qui a été appliqué au modèle GREEN est décrit dans l'encadré 2). Malgré ces différences entre les analyses, certains résultats apparaissent assez robustes.

Les réductions des émissions sont importantes

Le Protocole de Kyoto spécifie dans quelle mesure chacune des Parties doit limiter ses émissions par rapport au niveau qu'elles avaient atteint en 1990. Ce procédé conduit à une réduction d'environ 5 pour cent pour l'ensemble des Parties visées à l'Annexe 1, ce qui semble relativement modeste. Cela dit, les émissions ont déjà augmenté par rapport à l'année de référence et vont continuer de s'accroître tant que le Protocole n'aura pas été ratifié et que les pays n'auront pas pris de mesures concrètes. Ainsi, au fil des ans, la réduction nécessaire pour atteindre les objectifs du Protocole a tendance à augmenter alors que le temps imparti diminue. Le tableau 3 indique l'écart entre l'accroissement des émissions sur la période 1990-1995 et les objectifs assignés aux Parties de l'Annexe 1. Dans la plupart des pays Membres de l'OCDE, cet écart s'est sensiblement creusé. En 1995,

Encadré 2. Émissions de CO₂ dans le scénario de référence du modèle GREEN

La première étape dans la quantification des répercussions économiques du Protocole de Kyoto consiste à établir des projections plausibles quant aux émissions futures telles qu'on peut les prévoir en l'absence d'action des pouvoirs publics destinée à freiner leur augmentation (scénario dit « de référence »). Les objectifs fixés à Kyoto sont exprimés en pourcentage des émissions des Parties visées à l'Annexe 1 en 1990. Par conséquent, l'augmentation future des émissions telle qu'elle est prévue dans le scénario de référence est capitale pour déterminer les efforts nécessaires en vue de remplir les engagements pris à Kyoto.

Les principales hypothèses qui sous-tendent le scénario de référence portent sur l'évolution à venir des taux de croissance du PIB et de la population. En outre, ce scénario s'appuie sur des hypothèses concernant les progrès technologiques futurs dans le domaine de la production d'énergie, y compris le taux de l'amélioration autonome du rendement énergétique et le recours à de nouvelles sources d'énergie (notion de « technologies alternatives »).

Prévisions de croissance du PIB

Le modèle est calibré de manière à reproduire une évolution donnée du PIB. Cette évolution tient compte de la croissance démographique telle qu'elle est prévue par la Banque mondiale et des prévisions d'augmentation de productivité provenant de diverses sources. A moyen terme, les taux de croissance du PIB sont tirés des *Perspectives économiques de l'OCDE* (n° 63) et des prévisions à moyen terme afférentes. Les hypothèses à long terme relatives à la croissance du PIB sont inspirées des travaux du Secrétariat de l'OCDE sur le vieillissement de la population (voir Turner *et al.*, 1998). Le tableau 1 présente l'évolution de la croissance du PIB retenue dans le scénario de référence.

Hypothèses concernant l'énergie

Autre hypothèse importante : dans chaque pays/région, l'amélioration autonome annuelle du rendement énergétique est égale à 0.4 fois l'augmentation annuelle de la productivité du travail. En outre, le modèle prend en considération trois sources d'énergie alternatives : deux substituts des combustibles fossiles, l'un au carbone et l'autre sans, et l'énergie électrique produite sans carbone. Ces énergies alternatives sont censées être disponibles à partir de 2030, au même prix dans toutes les régions. Les prix ont été définis conformément aux recommandations du Energy Modelling Forum (EMF) de l'Université de Stanford (7 333 dollars de 1995 par térajoule pour le combustible à base de carbone, 13 333 dollars de 1995 par térajoule pour le combustible sans carbone et 27 778 dollars de 1995 par térajoule pour la production d'électricité sans carbone). Enfin, la version actuelle du modèle part du principe que les écarts entre les prix de l'énergie dans les différents pays reflètent les distorsions induites par les taxes et les subventions, qui sont censées

Encadré 2. Émissions de CO₂ dans le scénario de référence du modèle GREEN (suite)

Tableau 1. Prévisions de croissance du PIB utilisées dans le scénario de référence simulé avec le modèle GREEN
Taux de croissance annuel moyen, en pourcentage

	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2030	2030-2050
États-Unis	2.9	2.5	2.0	1.6	1.4
Union européenne	2.4	2.6	1.5	1.2	0.5
Japon	0.7	2.2	1.5	0.9	0.6
Autres pays OCDE	3.1	3.1	2.1	1.7	1.4
CEI	-2.5	3.5	4.5	4.0	3.5
Europe orientale	3.6	4.6	4.1	3.6	3.1
Pays de l'Annexe I	2.1	2.6	1.8	1.5	1.2
Chine	7.7	5.6	5.0	4.8	4.0
Inde	5.4	4.4	4.2	4.2	3.0
Économies dynamiques d'Asie	2.5	4.8	4.8	4.2	3.2
Brésil	1.7	3.1	2.9	2.8	2.0
Exportateurs d'énergie	2.0	2.2	2.2	2.2	2.9
Reste du monde	2.7	3.2	3.0	3.0	2.9
Pays hors Annexe I	3.1	3.7	3.6	3.5	3.2
Monde	2.3	2.8	2.2	2.0	1.8

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

demeurer constantes. Le niveau des subventions a été réactualisé sur la base de plusieurs études récentes (Banque mondiale, 1997 ; OCDE, 1997*a, b et c* ; Michaelis, 1996). Le prix mondial du pétrole reste constant en termes réels jusqu'en l'an 2000. Par la suite, il est déterminé de manière endogène, compte tenu des paramètres de la fonction d'épuisement des réserves. Ces paramètres ont été calibrés à partir des prévisions à moyen terme de l'AIE et des données du World Energy Resources Program (United States Geological Survey). Il en ressort que le prix mondial réel du pétrole augmente d'environ 2 pour cent par an en moyenne sur la période 1995-2050.

Émissions de CO₂ dans le scénario de référence

Les prévisions des émissions dépendent des hypothèses ci-dessus et de leurs interactions, compte tenu des prix mondiaux de l'énergie. Par conséquent, les émissions sont directement liées à la croissance future du PIB telle qu'elle est anticipée. De plus, dans la mesure où les réserves de pétrole et de gaz naturel s'épuisent, la demande d'énergie est réorientée vers le charbon et le combustible de remplacement à base de carbone. La teneur de ces combustibles en carbone étant plus élevée, les émissions de CO₂ par unité d'énergie consommée s'en trouvent augmentées. Le tableau 2 indique l'évolution future des émissions telle qu'elle est prévue dans le scénario de référence du modèle GREEN.

Encadré 2. **Émissions de CO₂ dans le scénario de référence du modèle GREEN (suite)**

Tableau 2. **Émissions de CO₂ dans le scénario de référence simulé avec le modèle GREEN**

Taux de croissance annuel moyen, en pourcentage

	1990-1995	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2030	2030-2050
États-Unis	1.3	2.2	2.0	1.9	0.9	0.9
Union européenne	-0.3	1.4	1.4	0.9	0.6	0.5
Japon	1.6	1.7	1.7	1.5	-0.9	0.2
Autres pays OCDE	1.6	2.4	2.3	2.0	1.4	1.3
CEI	-7.4	-2.0	2.7	3.4	2.9	2.6
Europe orientale	-3.1	1.2	1.8	2.0	2.6	2.3
Pays de l'Annexe 1	-1.1	1.2	2.0	1.9	1.2	1.4
Chine	4.8	5.5	5.5	5.2	5.2	3.1
Inde	6.4	3.5	3.8	3.8	3.9	3.0
Économies dynamiques d'Asie	8.8	3.0	3.3	3.2	2.2	2.5
Brésil	3.9	1.9	1.7	1.6	1.3	1.9
Exportateurs d'énergie	3.8	1.9	2.2	2.2	2.2	2.1
Reste du monde	0.1	4.8	1.3	1.2	1.6	2.9
Pays hors Annexe 1	4.6	3.9	3.8	3.7	3.9	2.9
Monde	0.8	2.2	2.7	2.7	2.6	2.3

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

il dépassait déjà 10 pour cent au Canada, aux États-Unis, au Japon et dans plusieurs pays de l'Union européenne dont le Danemark, l'Autriche, la Belgique et les Pays-Bas. Ainsi, de nombreux pays Membres de l'OCDE devront consentir un effort considérable pour atteindre l'objectif qui leur est imposé par le Protocole à moins qu'ils ne puissent recourir dans une large mesure aux « mécanismes de flexibilité ».

Si l'on se réfère aux scénarios de référence, qui diffèrent d'un modèle à l'autre mais qui supposent tous un accroissement futur des émissions, la plupart des pays Membres de l'OCDE devront réduire leurs émissions de 20 à 40 pour cent en 2010 (voir le tableau 4, colonne 1)³⁷, soit un effort d'une ampleur sans précédent susceptible d'exiger des ajustements structurels considérables. La Russie et l'Ukraine (ci-après désignées par l'abréviation CEI³⁸) constituent des exceptions notables. La diminution de la production, la déréglementation des marchés de l'énergie et la baisse sensible des subventions ont ramené les émissions dans la CEI en deçà du niveau atteint en 1990. Il se pourrait qu'en 2010, le niveau des émissions y soit très

Tableau 3. Évolution des émissions de GES, objectifs de Kyoto et répartition des réductions au sein de l'Union européenne

	Évolution en pourcentage 1990-1996	Objectifs de Kyoto pour 2008-2012 (en % de 1990)
Pays OCDE hors UE		
Australie	6	8
Canada	10	-6
République tchèque	-24	-8
Hongrie	-24	-6
Islande	5	1
Japon	8	-6
Nouvelle-Zélande	0	0
Norvège	6	1
Pologne	-22	-6
Suisse	-2	-8
États-Unis	5	-7
Union européenne (UE)		-8.0
<i>Partage de la charge, objectifs :</i>		
Autriche	1	-13.0
Belgique	6	-7.5
Danemark	10	-21.0
Finlande	3	0.0
France	0	0.0
Allemagne	-12	-21.0
Grèce	6	25.0
Irlande	4	13.0
Italie	2	-6.5
Luxembourg	-24	-28.0
Pays-Bas	8	-6.0
Portugal	6	27.0
Espagne	2	15.0
Suède	3	4.0
Royaume-Uni	-9	-12.5

Source : CNUCC, données nationales « officielles »

inférieur à celui que prévoient les engagements de Kyoto, même en l'absence de mesures de limitation : le scénario de référence simulé par le modèle GREEN fait état d'un écart (désigné par le terme d'« air chaud ») de plus de 14 pour cent par rapport aux engagements de la CEI, soit quelque 130 millions de tonnes de carbone.

Les coûts marginaux de réduction sont élevés dans les pays Membres de l'OCDE

Il existe plusieurs façons d'exprimer les coûts induits par la réduction des émissions de CO₂, la plus simple consistant à calculer les coûts marginaux de réduction pour chaque Partie de l'Annexe 1. Le tableau 4 indique que ces coûts risquent d'être assez élevés pour les pays Membres de l'OCDE s'ils doivent remplir leurs

Tableau 4. Estimations des coûts économiques de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto en 2010 sans recours aux mécanismes de flexibilité

		Réduction des émissions (en pourcentage) par rapport au scénario de référence, en 2010	Coûts marginaux en \$ 1995 par tonne de carbone	Coût total en pourcentage de réduction du PIB en 2010
États-Unis	WorldScan ¹	-28	41	-0.2
	G-Cubed ²	-39	82	-0.4
	POLES ⁴	-23	90	-0.2
	RICE ¹⁴	-27	148	-0.9
	AIM ⁵	-25	170	-0.4
	CETA ¹³	-34	191	-1.9
	SGM ¹²	-43	211	..
	MIT-EPPA ¹¹	-39	216	..
	GREEN	-36	231	-0.3 -0.3 (EVM)¹⁶
	MS-MRT ¹⁰	-41	272	-1.8
	Merge ³	-42	304	-1.0
	GTEM ⁸	-35	365	-2.1
Oxford Model ⁹	-42	464	-2.2	
Europe occidentale	WorldScan ¹	-29	83	-0.3
	PRIMES ⁶	-13	72	..
	POLES ⁴	-22	141	-0.1
	RICE ¹⁴	-24	184	-0.5
	GREEN	-22	189	-0.2 -0.8 (EVM)¹⁶
	MS-MRT ¹⁰	-21	272	-0.6
	GEM-E3 ⁷	-15	218	..
	AIM ⁵	-20	226	-0.4
	G-Cubed ²	-44	253	-1.7
	MIT-EPPA ¹¹	-35	319	..
	SGM ¹²	-21	452	..
	GTEM ⁸	-32	760	-1.0
Oxford Model ⁹	-25	1 077	-1.9	
Japon	WorldScan ¹	-22	93	-0.8
	G-Cubed ²	-36	106	-0.5
	GREEN	-32	182	0 -0.2 (EVM)¹⁶
	POLES ⁴	-27	260	-0.3
	AIM ⁵	-26	266	-0.2
	RICE ¹⁴	-36	279	-0.8
	GRAPE ¹⁵	-82	356	-0.2
	SGM ¹²	-40	411	..
	MS-MRT ¹⁰	-30	452	-1.7
	Merge ³	-33	559	-0.8
	MIT-EPPA ¹¹	-39	576	..
	GTEM ⁸	-26	733	-0.8
Oxford Model ⁹	-16	1 213	-1.9	

Tableau 4. Estimations des coûts économiques de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto en 2010 sans recours aux mécanismes de flexibilité (suite)

	Réduction des émissions (en pourcentage) par rapport au scénario de référence, en 2010	Coûts marginaux en \$ 1995 par tonne de carbone	Coût total en pourcentage de réduction du PIB en 2010
Europe orientale et CEI			
Europe orientale	WorldScan ¹	4	0.0
	GREEN	32	-0.3 0.1 (EVM)¹⁶
	GTEM ⁸	43	-0.5
CEI	WorldScan ¹	2	-1.1
	GREEN	0	-0.1 -1.7 (EVM)¹⁶
	AIM ⁵	0	-0.2
	GTEM ⁸	0	0.0

1. Les réductions des émissions et les coûts économiques sont tirés des travaux de Gielen et Koopmans (1998) ; les taxes sur le carbone sont tirées de Bollen, *et al.* (1998).
2. Le Global General Equilibrium Growth Model de l'Université nationale d'Australie, de l'Université du Texas et de l'Environment Protection Agency des États-Unis ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
3. Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reductions Policies, Stanford University et Electric Power Research Institute ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
4. Les chiffres tirés de POLES sont basés sur des interpolations réalisées sur la base du graphique 2, page 35 et du graphique 3, page 36 de l'étude de Capros, OCDE, 1998a.
5. L'Asian Pacific Integrated Model, National Institute for Environmental Studies (NIES-Japon) et de l'université de Kyoto ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9. Les chiffres pour les CEI sont tirés de l'étude de Kainuma *et al.*, OCDE, 1998a, page 167.
6. Les chiffres de PRIMES se rapportent à 8 pays de l'UE et sont des interpolations réalisées sur la base du graphique 4, page 41 de l'étude de Capros, OCDE, 1998a.
7. Les chiffres de GEM-E3 se rapportent à 14 pays de l'UE et sont des interpolations réalisées sur la base du graphique 5, page 43, de l'étude de Capros, OCDE, 1998a.
8. Global Trade and Environment Model, Australian Bureau of Agriculture and Resource Economics (ABARE, Australie) ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9. Les chiffres pour la CEI et l'Europe orientale sont tirés de Tulpulé *et al.*, OCDE, 1998a.
9. Oxford Economic Forecasting model ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
10. Multi-Sector, Multi-Region Trade Model, Charles River Associates et Université du Colorado ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
11. Emissions Projections and Policy Analysis Model, Massachusetts Institute of Technology ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
12. Second Generation Model, Batelle Pacific Northwest National Laboratory ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
13. Carbon Emissions Trajectory Assessment Model, Electric Power Research Institute et Teisberg Associates ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
14. Regional Integrated Climate and Economy Model, Université de Yale ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
15. Global Relationship Assessment to Protect the Environment Model, Institute for Applied Energy (Research Institute of Innovative Technology for Earth (Japon) et Université de Tokyo ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
16. EVM = équivalent de variation du revenu réel des ménages

obligations individuellement. D'après la majorité des modèles, ils pourraient s'échelonner entre 100 et plus de 300 dollars de 1995 par tonne de carbone, voire davantage au Japon³⁹. Bien qu'elles aboutissent à des résultats différents de ceux du modèle GREEN, la plupart des études disponibles font état de coûts marginaux de réduction plus élevés dans l'Union européenne, au Japon et dans le reste de la zone de l'OCDE (Canada, Australie et Nouvelle-Zélande, principalement) qu'aux États-Unis⁴⁰. En revanche, ils sont inférieurs en Europe orientale et nuls dans la CEI, où la limite fixée à Kyoto n'entraîne pas d'obligation.

Les coûts économiques totaux semblent peu élevés si les salaires réels s'ajustent

La colonne de droite du tableau 4 révèle que, d'après la plupart des modèles, les coûts économiques totaux (exprimés en pourcentage du PIB ou du revenu réel total) se situeraient aux alentours de 1 pour cent ou en deçà⁴¹. Bien qu'elle n'ait pas à limiter ses émissions de carbone⁴², la CEI enregistrerait des pertes compte tenu d'une évolution des termes de l'échange en sa défaveur suite à la diminution des recettes qu'elle tire de ses exportations d'énergie. À l'inverse, l'augmentation légère du revenu réel en Europe orientale est due à la baisse des prix mondiaux du pétrole.

Ces estimations globales des coûts peuvent sembler étonnamment modestes en regard de l'ampleur des réductions d'émissions et de leurs coûts marginaux élevés. Il faut garder à l'esprit, lors de l'analyse des résultats, que les coûts indiqués par les modèles économiques mondiaux (comme GREEN, Merge ou WorldScan) correspondent *grosso modo* aux « pertes sèches pour l'économie ». Ainsi, ils prennent en considération non pas les coûts de réduction totaux (mesurés, par exemple, par les recettes de la taxe sur le carbone nécessaire pour faire diminuer les émissions), mais la perte d'efficacité économique (en termes de variation des surplus des producteurs et des consommateurs) associée à la réaffectation des ressources résultant de la limitation des émissions de carbone. Les simulations considèrent également que les mesures nationales sont mises en œuvre d'une manière efficace du point de vue des coûts en ce sens qu'elles augmentent les coûts marginaux de réduction des émissions de CO₂ de manière uniforme dans tous les secteurs (les distorsions préexistantes étant néanmoins maintenues ; voir page 70). Par conséquent, le faible niveau des coûts estimés ne doit pas faire oublier que certains secteurs et certains pays, y compris hors Annexe I, seraient très affectés. Par ailleurs, comme nous le verrons plus loin, l'incidence de la réduction des émissions sur les concentrations atmosphériques et sur le changement climatique sera modeste. Pour obtenir un résultat significatif du point de vue du réchauffement de la planète, des efforts beaucoup plus importants devront être consentis avec la participation d'un plus grand nombre de pays, de sorte que les coûts (et les avantages qu'il y aura à les minimiser) seront d'autant plus élevés.

En outre, la plupart des modèles économiques mondiaux tendent à sous-évaluer les coûts économiques de la limitation des émissions de carbone, en par-

ticulier à court et moyen termes, parce qu'ils partent du principe que le travail et le capital sont réaffectés sans rigidité à la suite de la hausse des prix du carbone. Or des réductions des émissions telles que celles qui sont prévues par le Protocole de Kyoto auront sans doute de lourdes conséquences pour certains secteurs, avec pour corollaire une perte de rentabilité des moyens de production existants et des suppressions d'emplois. Les répercussions des réductions, si elles se traduisent par une augmentation du coût de la vie, pourraient alimenter le chômage dans le cas où les salaires réels ne s'ajusteraient pas suffisamment à moyenne échéance. A ce jour, les analyses de ces coûts restent lacunaires dans la littérature⁴³.

Le modèle GREEN tient compte de certains coûts d'ajustement liés à la réaffectation du capital⁴⁴. Toutefois, comme le montrent les résultats figurant dans le tableau 4, les coûts globaux estimés, incluant ces coûts d'ajustements, restent modestes. Quant à l'ampleur de la redistribution du travail induite par les réductions d'émissions, il ressort des estimations obtenues à partir du modèle GREEN, qui peuvent paraître basses, qu'elles pourraient être limitées à 0.2 pour cent de l'ensemble de la main-d'œuvre en 2010⁴⁵. Les coûts transitoires liés à la redistribution de l'emploi ne devraient pas se traduire par une augmentation significative des coûts totaux estimés, notamment si l'on tient compte du fait que le taux de rotation des emplois est de l'ordre de 15 à 30 pour cent dans la plupart des pays Membres de l'OCDE (OCDE, 1996). En revanche, la rigidité des salaires réels pourrait considérablement accroître les coûts totaux de la réalisation des objectifs définis à Kyoto (voir encadré 3). Plusieurs études ont montré qu'au moins à court terme, les salaires réels ne s'ajustent pas suffisamment pour empêcher une augmentation du chômage⁴⁶. Cependant, l'estimation économétrique de ces rigidités reste incertaine et les résultats qui en découlent sont difficiles à incorporer dans un modèle d'équilibre général. C'est pourquoi la démarche décrite dans l'encadré 3 a seulement valeur d'illustration. Elle consiste à tester l'hypothèse de rigidité des salaires réels dans le but de quantifier les répercussions qu'elle aurait sur les coûts de mise en œuvre du Protocole de Kyoto. D'après les résultats obtenus, les coûts totaux pourraient être multipliés plusieurs fois, suivant le type et le degré de rigidité. On peut formuler ce résultat autrement en disant que les coûts totaux de la mise en œuvre du Protocole seront d'autant plus bas que les marchés du travail seront flexibles et à même de s'adapter.

Il convient néanmoins de noter que d'après certaines hypothèses, les coûts économiques pourraient être moins élevés que ne le laissent prévoir les simulations. Premièrement, les recettes des taxes sur le carbone ou des ventes de permis peuvent être utilisées pour réduire les prélèvements qui faussent actuellement l'affectation des ressources. Deuxièmement, comme nous l'avons déjà signalé, dans l'éventualité où la réduction des émissions de gaz autres que le CO₂ serait moins onéreuse, les coûts totaux seraient moindres (voir page 73). Troisièmement, la réduction d'autres distorsions pesant sur l'économie, induites par exemple par

Encadré 3. Effets de la rigidité des salaires réels

La plupart des simulations de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto, y compris celles du modèle GREEN, supposent que les salaires s'ajustent librement, de telle sorte qu'il n'y a pas de répercussions sur l'emploi¹. Néanmoins, l'observation des faits corroborée par la théorie et les études économétriques, indique que le marché de l'emploi, dans de nombreux pays Membres de l'OCDE, se caractérise par une forte rigidité des salaires réels à moyen terme. Ainsi, dans le meilleur des cas, les résultats obtenus à partir des scénarios ne sont en fait révélateurs que des effets à long terme. Il en découle que ces scénarios sous-estiment sans doute pour la plupart les coûts de la réalisation des objectifs, au moins à moyen terme. L'objet du présent encadré est d'attribuer un ordre de grandeur à cette sous-estimation potentielle.

Selon une étude de l'OCDE (1999a), les salaires réels mettent beaucoup plus de temps à atteindre leur niveau d'équilibre à long terme dans l'Union européenne qu'aux États-Unis. Ainsi, en quatre à cinq ans, l'ajustement ne s'opère qu'à hauteur de 50 pour cent. Plusieurs exemples, dans la littérature, font état de résultats comparables. Cela étant, les évaluations économétriques du lien entre les salaires réels et le chômage sont discutables. De plus, elles sont difficiles à intégrer dans un modèle d'équilibre général, qui ne prend en considération que l'évolution des prix relatifs mais omet l'inflation. Par conséquent, la démarche adoptée ici est plus schématique. Fondamentalement, elle repose sur une hypothèse extrême en vertu de laquelle les salaires réels sont totalement rigides dans les pays Membres de l'OCDE, de manière à estimer le niveau maximum possible de l'impact de la rigidité des salaires réels sur les coûts de mise en œuvre du Protocole de Kyoto.

D'après les scénarios où les salaires sont flexibles (simulés avec la version standard du modèle GREEN), à mesure que la réduction des émissions fait augmenter le coût de la vie, le niveau d'équilibre des salaires réels diminue. En l'absence d'échanges de permis, les salaires réels enregistrent une baisse comprise entre 3 et près de 4 pour cent d'ici 2010 dans les pays Membres de l'OCDE. En revanche, les salariés sont en partie dédommagés de leur perte de pouvoir d'achat par la redistribution des recettes des taxes sur le carbone et des ventes de permis². Cette compensation prise en compte, les salariés perdent encore 0.5 à 1.5 pour cent de leur « salaire réel disponible »³ en 2010. L'analyse qui suit part de l'hypothèse alternative selon laquelle les salaires réels sont totalement rigides, c'est-à-dire qu'ils restent exactement au même niveau que dans le scénario de référence. Entre ces deux hypothèses extrêmes (rigidité totale et flexibilité parfaite), un scénario intermédiaire suppose que les salaires réels disponibles demeurent inchangés. A mesure que s'accroissent les rigidités qui empêchent le marché de l'emploi d'atteindre l'équilibre et dès lors que les salaires réels (ou les salaires disponibles réels) fixes dépassent le niveau d'équilibre, le modèle calcule d'une manière endogène l'augmentation correspondante du chômage.

Encadré 3. Effets de la rigidité des salaires réels (suite)

Le tableau 5 révèle que la rigidité des salaires réels est susceptible d'entraîner une majoration substantielle des coûts de mise en œuvre du Protocole de Kyoto. Si les pays concernés poursuivent leurs objectifs de réduction des émissions individuellement (haut du tableau 5) alors que les salaires réels sont totalement rigides, le PIB des pays Membres de l'OCDE pourrait baisser de 4 pour cent en 2010 (contre 0.2 pour cent en présence de salaires flexibles) et le revenu réel des ménages de 4.6 pour cent (au lieu de 0.5 pour cent). Cet impact est beaucoup moins prononcé au Japon (baisse de 1.6 pour cent du revenu réel et de 1.4 pour cent du PIB), la simulation avec les salaires flexibles (version standard) impliquant une moindre diminution du salaire réel d'équilibre suite à la mise en application du Protocole. Les effets sur l'emploi sont sensibles : à l'échelle de l'OCDE, le taux de chômage moyen augmente de quelque 5 points de pourcentage. Les simulations s'appuient sur l'hypothèse implicite selon laquelle l'offre de travail demeure constante. Dans la pratique, un recul significatif de l'emploi s'accompagnerait probablement d'une chute de l'offre qui limiterait partiellement le chômage.

Dans l'hypothèse où les « salaires réels disponibles » sont rigides, les coûts totaux sont inférieurs, mais restent sensiblement plus élevés qu'en présence de salaires flexibles (côté droit du tableau 5). Dans ce scénario, les salariés sont en partie dédommés de leur perte de pouvoir d'achat par la redistribution des recettes des taxes sur le carbone et prennent cette compensation en considération dans leurs revendications salariales, ce qui suppose des salaires réels fixes moins élevés que dans l'hypothèse précédente. Ainsi, dans cette hypothèse, les coûts sont moins élevés qu'en présence de salaires réels totalement rigides (notamment aux États-Unis, où les recettes des taxes sur le carbone et des ventes de permis sont relativement plus importantes), mais demeurent substantiels dans certains pays ou régions telles que l'Union européenne (plus de 3 pour cent en 2010). Pour l'ensemble des pays Membres de l'OCDE, en 2010, la perte atteindrait en moyenne 1.4 pour cent en termes de PIB (contre 0.2 pour cent lorsque les salaires sont flexibles) et 1.8 pour cent en termes de revenu réel (au lieu de 0.5 pour cent). L'Union européenne enregistrerait, proportionnellement, une perte beaucoup plus sensible que le reste de l'OCDE. Dans ce scénario, les conséquences sur le chômage seraient moins importantes elles aussi.

La partie inférieure du tableau 5 montre les coûts correspondants dans l'hypothèse où le commerce de permis est autorisé (sur cette question, voir page 50). Si les salaires réels sont totalement rigides, les coûts totaux sont à peu près divisés par deux. Si les salaires réels « disponibles » sont rigides, la réduction des coûts totaux obtenue grâce au commerce de permis est moindre.

1. Au moins deux études tiennent compte dans une certaine mesure de la rigidité des salaires sur l'estimation des coûts macro-économiques de l'application du Protocole. Bayar (1998) analyse l'effet de la taxation du CO₂ et de l'énergie sur l'emploi en Europe en partant de l'hypothèse que les salaires sont fixés dans le cadre de négociations. Cependant, l'étude ne met pas en évidence les répercussions de cette hypothèse particulière sur les coûts, ceux-ci étant fortement réduits par l'effet du recyclage des recettes fiscales sous forme de réduction des contributions de sécurité sociale. McKibbin *et al.* (1999) tiennent compte de

Encadré 3. Effets de la rigidité des salaires réels (suite)

la rigidité des salaires nominaux dans le modèle G-Cubed, mais dans ce cas également, l'impact de cette hypothèse sur les coûts estimés n'est pas identifié. D'après les résultats du modèle de prévision économique d'Oxford présentés dans le tableau 4, les coûts d'ajustement peuvent potentiellement se traduire par une augmentation des pertes économiques induites par la mise en œuvre des objectifs de Kyoto.

2. Dans le modèle GREEN, les recettes des taxes sur le carbone et des ventes de permis sont redistribuées aux ménages sous forme de transferts forfaitaires, de sorte que le solde des comptes publics demeure inchangé. Toutefois, dans la pratique, toutes les réductions des émissions de gaz à effet de serre ne génèrent pas des recettes fiscales. De ce fait, le recyclage des recettes ne sera pas aussi important que le supposent ces simulations.
3. Le salaire réel « disponible » correspond au salaire réel augmenté de la part des recettes de la taxe sur le carbone revenant aux salariés. Dans les simulations réalisées pour étayer cet encadré, ces recettes sont en partie allouées aux chômeurs (sur la base d'un taux de remplacement du salaire de 30 pour cent) et en partie redistribuées entre les salariés et les détenteurs du capital, au prorata du poids de leurs revenus dans le PIB total.

les subventions à l'énergie (voir page 70) permettrait d'atteindre les objectifs du Protocole à un moindre coût.

Les prix de l'énergie augmentent et sa production diminue

Les taxes sur le carbone ou le prix des permis échangés à l'intérieur d'un même pays, s'ils se situent dans la fourchette correspondant aux coûts marginaux indiqués dans le tableau 4, entraîneront probablement une forte augmentation des prix de l'énergie. Le graphique 1 illustre la hausse des prix simulée par le modèle GREEN. Dans les pays Membres de l'OCDE, le prix du charbon serait majoré de 200 à 400 pour cent (par rapport au scénario de référence). Le prix des autres sources d'énergie augmenterait également : le prix moyen à la consommation des services fournis par le secteur de l'énergie s'élèverait de plus de 50 pour cent (sauf au Japon)⁴⁷. Ces effets, non négligeables pour le consommateur, sont en partie compensés par les recettes supplémentaires tirées de la taxation du carbone, qui, selon une hypothèse retenue dans le modèle GREEN, sont redistribuées aux consommateurs sous forme forfaitaire⁴⁸.

En 2010, la production d'énergie est sensiblement réduite (graphique 2). C'est la production de charbon qui diminue le plus. Celle de l'électricité se contracte beaucoup moins, voire augmente. Nombreux sont ceux qui craignent que le Protocole ait des répercussions négatives pour les secteurs à forte intensité d'énergie (acier, ciment, pâtes et papiers, etc.). Les résultats diffèrent quelque peu sur ce point. D'après les simulations du modèle Merge, la production de ces secteurs, dans

Tableau 5. **Impact économique des rigidités des salaires réels dans le contexte du Protocole de Kyoto**
Écart en pourcentage par rapport au scénario de référence en 2010

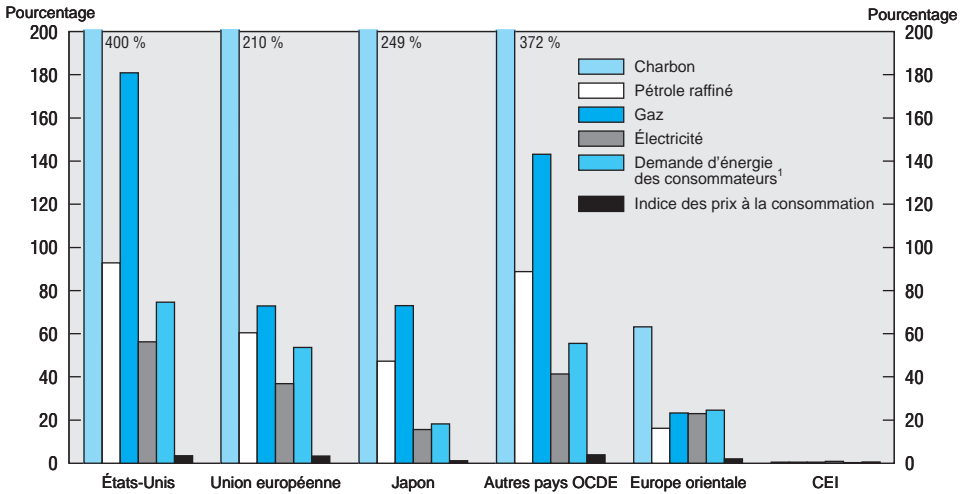
	Sans échange de permis :							
	Flexibilité totale des salaires réels		Rigidité complète des salaires réels			Rigidité du revenu réel « disponible » ¹		
	PIB	Revenu réel des ménages	PIB	Revenu réel des ménages	Taux de chômage ²	PIB	Revenu réel des ménages	Taux de chômage ²
États-Unis	-0.3	-0.3	-4.6	-5.1	5.8	-0.7	-0.7	0.6
Union européenne	-0.2	-0.9	-4.8	-6.1	5.8	-3.1	-4.0	3.7
Japon	-0.0	-0.2	-1.4	-1.6	2.0	-0.3	-0.5	0.4
Autres OCDE	-0.3	-0.7	-4.7	-5.7	6.1	-1.2	-1.6	1.3
CEI	-0.3	-1.7	-0.3	-1.9	0.0	-0.3	-1.8	0.0
Europe orientale	-0.2	0.1	-0.3	-0.5	0.0	-0.3	-0.3	0.0
Total OCDE	-0.2	-0.5	-4.0	-4.6	5.1	-1.4	-1.8	1.7
Total pays de l'Annexe I	-0.2	-0.5	-3.8	-4.5	4.9	-1.4	-1.8	1.7
	Avec échange de permis :							
États-Unis	-0.2	-0.4	-2.4	-2.9	3.0	-0.7	-1.0	0.8
Union européenne	-0.1	-0.4	-2.4	-3.0	2.9	-1.6	-2.0	2.0
Japon	-0.0	-0.2	-0.8	-0.9	1.1	-0.3	-0.4	0.4
Autres OCDE	-0.2	-0.6	-2.4	-3.2	3.1	-0.9	-1.4	1.1
CEI	-1.1	8.5	-1.1	7.5	0.0	-1.1	8.1	0.0
Europe orientale	-0.5	1.1	-0.5	0.6	0.0	-0.5	0.8	0.0
Total OCDE	-0.1	-0.4	-2.1	-2.5	2.6	-0.9	-1.2	1.2
Total pays de l'Annexe I	-0.1	-0.1	-2.0	-2.2	2.5	-0.9	-1.0	1.1

1. Ce qui signifie que le salaire réel « disponible » ne peut dépasser son niveau du scénario de référence bien que, en réalité, il ait été fixé à un niveau légèrement plus faible que dans ce scénario (-0.2 pour cent).

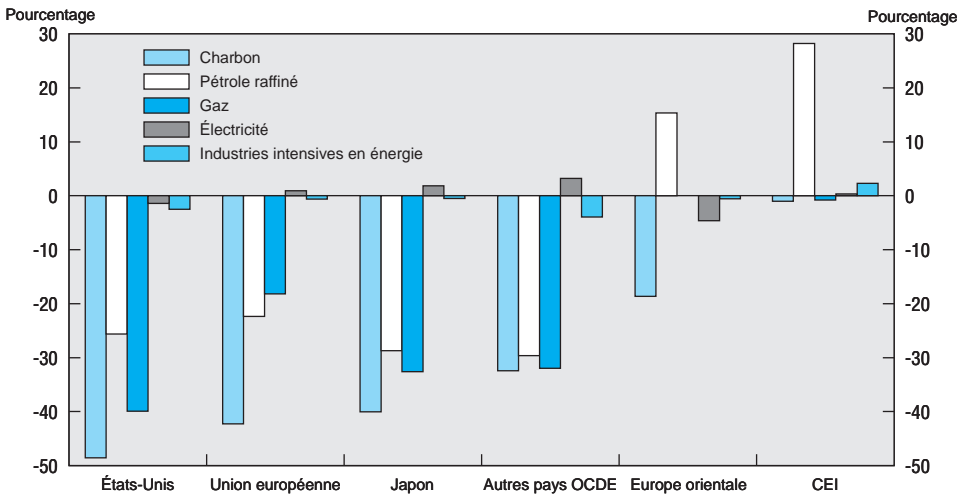
2. En pourcentage de la population active.

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique 1. Mise en œuvre du Protocole : augmentation des prix de l'énergie en 2010 (en l'absence d'échange de permis)
En pourcentage



Graphique 2. Mise en œuvre du Protocole : variations de la production en 2010 (en l'absence d'échange de permis)
En pourcentage



1. Prix moyen de la demande agrégée des consommateurs en « combustibles et électricité » dans le modèle GREEN.
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

certaines Parties de l'Annexe 1, pourrait enregistrer une chute allant jusqu'à 10 pour cent en 2010 (Manne et Richels, 1998). Les résultats obtenus avec le modèle GREEN font quant à eux état de conséquences moins prononcées, la production des secteurs en question ne diminuant que de 1 pour cent au Japon et dans l'Union européenne, de 3 pour cent aux États-Unis et de 4 pour cent dans les autres pays membres de l'OCDE.

Le prix du pétrole sera affecté, mais les « fuites de carbone » devraient rester limitées

La mise en œuvre du Protocole de Kyoto aura probablement une incidence importante sur le marché international du pétrole brut. D'après les résultats du modèle GREEN, la diminution de la consommation de pétrole dans les pays de l'Annexe 1 se traduirait dans les pays exportateurs par une perte de revenu réel de 3 pour cent, donc nettement plus sensible, proportionnellement, que celles que risquent d'enregistrer les pays de l'Annexe 1 selon les estimations. En revanche, certains pays en développement importateurs de pétrole pourraient bénéficier de la baisse des prix (le Brésil, par exemple).

La contraction des prix du pétrole entraînera probablement des « fuites de carbone » en vertu desquelles la réduction des émissions obtenue dans les pays de l'Annexe 1 pourrait être en partie compensée par un accroissement des émissions dans les autres pays. Ce phénomène risque de se manifester à la faveur de la récession des industries à forte intensité d'énergie dans les pays de l'Annexe 1, où elles deviendront moins compétitives. Cependant, comme en témoignent les simulations du modèle GREEN, la diminution de la production s'annonce relativement limitée dans les secteurs concernés (de l'ordre de 1 à 5 pour cent – graphique 2) et les « fuites de carbone » dans ce cadre ne devraient pas être considérables. Plus généralement, les « fuites de carbone » sont imputables essentiellement à l'adoption de sources d'énergie meilleur marché dans les pays non signataires.

On peut concevoir que plus les capitaux sont mobiles sur le marché international, plus les « fuites de carbone » sont importantes, mais d'après les résultats des simulations, ce facteur n'a que peu d'effet et pourrait même contribuer à réduire les fuites dans certaines circonstances (McKibbin, Shackleton et Wilcoxon, 1997 ; Burniaux et Oliveira Martins, 1999). Les économies d'échelle et la concurrence imparfaite, qui conduisent à la relocalisation des entreprises à l'échelle internationale, seraient également au nombre des facteurs susceptibles de déterminer l'ampleur des fuites, mais leur influence n'a pas été quantifiée à ce jour. Dans l'ensemble, les modèles disponibles donnent des résultats très divergents quant à l'ampleur des « fuites de carbone » qui résulteraient de la mise en œuvre du Protocole (encadré 4). Selon les simulations réalisées avec les modèles Merge (Manne et Richels, 1998), G-Cubed (McKibbin, Shackleton et Wilcoxon, 1998) et

Encadré 4. « Fuites de carbone » : un problème non résolu

Les réductions unilatérales (par exemple par les pays de l'Annexe I dans le cadre du Protocole de Kyoto) risquent d'être compensées, au moins en partie, par ce que l'on appelle les « fuites de carbone ». Celles-ci correspondent à d'éventuelles augmentations des émissions de carbone dans les pays hors Annexe I, en réaction aux réductions mises en œuvre dans les pays de l'Annexe I. Des fuites importantes limiteraient les effets du Protocole sur l'environnement et compliqueraient davantage son extension aux pays hors Annexe I (voir encadré 6).

Les fuites résultent d'un enchaînement d'interactions complexes entre les marchés de l'énergie et ceux des autres produits et services, ainsi qu'au sein de ces marchés. En l'absence d'observations directes, le seul moyen d'évaluer leur ampleur potentielle est de procéder à des simulations. Néanmoins, à ce jour, les modèles mondiaux n'ont pas permis d'obtenir une image cohérente de l'ampleur et de la distribution des « fuites de carbone » occasionnées par la mise en œuvre du Protocole. En l'absence de consensus sur cette question, le présent encadré analyse les principaux facteurs qui conditionnent ces « fuites ».

Mécanismes sous-jacents des « fuites de carbone »

Les « fuites de carbone » peuvent être engendrées par différents mécanismes. Pour simplifier, il est utile de distinguer deux grands types d'interactions :

- Le premier est lié aux marchés des produits et services non énergétiques. Les réductions d'émissions de carbone imposées unilatéralement provoquent une hausse des coûts de production qui se répercute sur la compétitivité des secteurs qui consomment beaucoup d'énergie. Ceux-ci enregistrent des pertes de compétitivité sur le marché international, au profit des entreprises installées dans les pays où les émissions ne sont pas limitées, d'où un déplacement de la production des biens à forte intensité d'énergie. Les modèles représentent en général ce mécanisme en utilisant des élasticités de substitution des échanges (élasticités « Armington »). La réaffectation des investissements directs étrangers qui s'ensuit peut contribuer soit à accroître, soit à atténuer les « fuites de carbone » occasionnées par la voie des marchés des produits et services non énergétiques.
- Le second est lié aux marchés internationaux de l'énergie. Des réductions unilatérales des émissions dans un groupe de pays représentant une fraction importante de la demande mondiale de carbone entraîneraient une chute du prix international de celui-ci, d'où un accroissement de la demande d'énergie et des émissions de carbone dans le reste du monde. De toute évidence, la structure du marché international du carbone joue en l'occurrence un rôle important.

Encadré 4. « Fuites de carbone » : un problème non résolu (suite)

Si le pétrole peut être considéré comme un bien homogène, le degré d'intégration du marché mondial du charbon est moins bien défini¹. La réaction des producteurs de carbone, notamment des producteurs de charbon, en termes d'offre, exercera elle aussi une influence, qui pourrait même être plus sensible que celle de la structure du marché international du carbone. En effet, la possibilité de réduire les émissions mondiales de carbone dépend en définitive de la décision de ces producteurs de, soit continuer à extraire le carbone, soit le laisser enfoui. Dans les modèles, les choix des producteurs de carbone sont en l'occurrence déterminés par les élasticités de l'offre de charbon, de pétrole et de gaz naturel.

D'autres facteurs pourraient aussi se révéler importants dans la détermination de l'ampleur des « fuites » susceptibles de découler de l'application du Protocole de Kyoto :

- Le stock d'« air chaud » de la Fédération de Russie et de l'Ukraine implique que les émissions, dans ces deux pays, ne sont pas soumises à des limites contraignantes. Cela crée un risque de « fuites de carbone » au sein du groupe des pays de l'Annexe 1. Bien que ces émissions supplémentaires soient techniquement comptabilisées comme des « fuites »², elles n'exercent pas d'influence sur les concentrations de carbone à long terme, compte tenu des possibilités de « mise en réserve » prévues par le Protocole (voir page 22).
- Certains scénarios de modélisation prévoient une baisse du prix international du pétrole par rapport à celui du charbon à la suite de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto, qui conduirait à une diminution de la demande de charbon au profit du pétrole et à une réduction de l'intensité de carbone dans certains pays consommateurs de charbon (d'où des « fuites négatives », les émissions chutant dans certains pays hors Annexe 1, comme la Chine). Les « fuites négatives » s'expliquent par une faible élasticité de l'offre de pétrole comparée à une élasticité élevée de l'offre de charbon.
- Enfin d'autres facteurs sont susceptibles d'influer sur l'ampleur des « fuites », notamment les répercussions négatives sur les revenus dans les pays exportateurs d'énergie ou les différents degrés d'intégration des marchés envisagés dans le scénario de référence. Ces facteurs exerceront probablement une influence secondaire limitée à l'horizon temporel de la première période d'engagement.

Résultats analytiques

Comme le montrent les explications ci-dessus, les « fuites de carbone » résultent de diverses interactions entre différents marchés et se prêtent donc aisément à une analyse au moyen d'un modèle d'équilibre général. À l'aide d'un modèle CGE statique simplifié, Burniaux et Oliveira-Martins (1999) ont tenté d'isoler, parmi

Encadré 4. « Fuites de carbone » : un problème non résolu (suite)

les paramètres mentionnés ci-dessus, ceux qui influent le plus sur le taux de « fuites ». Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'influence des marchés de produits et services non énergétiques est moindre qu'on ne le pense souvent. Abstraction faite du cas où les valeurs des élasticités de substitution des échanges sont faibles (inférieures à 2), auquel cas les « fuites » sont très limitées, le taux de « fuites » est peu sensible au degré de substitution sur les marchés des produits et services non énergétiques. De même, le degré de mobilité des capitaux internationaux n'influe pas significativement sur les « fuites ». Le modèle G-Cubed, qui comporte une description plus élaborée des marchés internationaux de capitaux, aboutit à des résultats similaires. Il révèle que la réaffectation des capitaux imputable à la mise en œuvre du Protocole de Kyoto se produirait en majeure partie au sein des pays de l'Annexe 1, plutôt qu'à destination des autres pays, et contribuerait donc peu aux « fuites de carbone » (McKibbin *et al.*, 1999).
- L'élasticité de l'offre de carbone est de loin le facteur le plus influent. Une élasticité supérieure à 4-5 se traduit par des taux de « fuites » limités et relativement stables. En revanche, lorsqu'elle tombe en deçà de 4, les « fuites » s'accroissent très sensiblement (atteignant jusqu'à 40 pour cent). Dans une situation extrême, qui corrobore l'intuition qui sous-tend cette analyse, une offre de carbone totalement inélastique rendrait impossible la réduction des émissions mondiales de carbone, puisque le taux de fuites serait par définition égal à 100 pour cent pour toute réduction mise en œuvre unilatéralement. Parallèlement, si l'offre de carbone est élastique (notamment dans le cas du charbon) à moyen terme, comme le postule le modèle GREEN, les « fuites de carbone » sont faibles.
- L'élasticité de l'offre de carbone exerce une plus grande influence que le degré de substitution sur le marché international du carbone. Dans le modèle GREEN, le charbon est considéré comme un bien quasiment homogène, mais, comme le montre le tableau 6, cette hypothèse est sans conséquence sur le niveau des « fuites ». Une élasticité élevée de l'offre de charbon se traduit systématiquement par un taux de « fuites » faible quel que soit le degré de substitution supposé sur le marché international du charbon³. Toutefois, le degré d'hétérogénéité du marché du charbon a davantage de conséquences lorsque la valeur de l'élasticité de l'offre de charbon est faible (voir le scénario S2 dans le tableau 6).
- Enfin, l'ampleur des « fuites de carbone » est également déterminée par le degré de substitution dans la fonction de production. Ce point est rarement abordé dans les analyses qui ont été publiées. Une plus grande substitution des facteurs entraîne des fuites plus importantes, car elle amplifie la diminution de la demande de carbone et la hausse de la demande d'autres facteurs, y compris les sources d'énergie sans carbone, d'où un ajustement plus prononcé des prix internationaux. L'analyse de sensibilité conduite à l'aide du modèle WorldScan confirme ce résultat (Bollen *et al.*, 1999).

Encadré 4. « Fuites de carbone » : un problème non résolu (suite)

Tableau 6. Taux de « fuite » dans le Protocole de Kyoto en fonction de diverses hypothèses

	Spécification de base	S1	S2	S3	S4	S5
Sans échange de permis	4.8 %	22.9 %	12.6 %	27.3 %	4.6 %	5.1 %
Avec échange de permis	2.2 %	17.4 %	8.7 %	21.5 %	2.1 %	2.5 %

Spécification de base : Élasticité-offre (à la baisse) infinie du charbon, élasticité-offre du pétrole = 2, élasticités de substitution des échanges pour le charbon = 4-5, le pétrole étant traité comme un produit homogène.

S1 : Élasticité-offre du charbon fixée à 0.1, tous les autres paramètres correspondant à la définition de la spécification de base.

S2 : Élasticité-offre du charbon fixée à 0.1 et l'élasticité de substitution des échanges pour le charbon = 0.5, tous les autres paramètres correspondant à la définition de la spécification de base.

S3 : Élasticité-offre du charbon fixée à 0.1, l'élasticité-offre du pétrole fixée à 0.5 ; tous les autres paramètres correspondant à la définition de la spécification de base.

S4 : Élasticités de substitution des échanges pour le charbon = 0.5 ; tous les autres paramètres correspondant à la définition de la spécification de base.

S5 : Élasticités de substitution des échanges pour le charbon = 10 ; tous les autres paramètres correspondant à la définition de la spécification de base.

Source : Burniaux et Oliveira Martins (1999).

Il ressort des simulations obtenues avec le modèle GREEN que les « fuites de carbone », sont limitées pour des valeurs des paramètres telles qu'on les trouve les plus fréquemment citées dans la littérature (et qui ont été utilisées dans le modèle GREEN). Notamment, les résultats reflètent l'hypothèse selon laquelle l'offre de charbon est relativement élastique à moyen terme. Le grand nombre de mines de charbon qui ont été fermées ces dernières années en Europe et ailleurs dans l'OCDE corroborent ce postulat. Toutefois, des données empiriques supplémentaires quant à la réaction, de l'offre, des producteurs de charbon et de pétrole seraient à l'évidence nécessaires pour le valider.

1. Compte tenu de coûts de transport élevés, de l'importance des infrastructures et d'autres aspects techniques, les échanges de charbon ont à ce jour été limités à une fraction de la production mondiale. Cependant, d'après Kolstad, Light et Rutherford (1999), le marché international du charbon est plus intégré qu'il ne le semble.
2. Dans Bollen *et al.* (1999) et dans les calculs du modèle GREEN de l'OCDE, les « fuites » au sein des pays de l'Annexe 1 sont comptabilisées sous cet angle.
3. A telle enseigne que l'incertitude au sujet du degré d'intégration du marché international du charbon n'est importante que dans les cas où l'offre de charbon est inélastique, comme le signale Kolstad *et al.* (1999).

MIT-GTAP (Babiker et Jacoby, 1999), les taux de « fuites » (rapport entre les émissions supplémentaires dans les pays hors Annexe 1 et l'ensemble des réductions dans les pays de l'Annexe 1) sont inférieurs à 10 pour cent. Le modèle GREEN les estime quant à lui aux alentours de 5 pour cent⁴⁹. En revanche, d'autres modèles – par exemple WorldScan (Bollen *et al.*, 1999) et MS-MRT (Bernstein *et al.*, 1999) – font état de taux de « fuites » beaucoup plus importants approchant 20 pour cent des réductions d'émissions initiales dans les pays de l'Annexe 1. Ces divergences sont difficiles à expliquer, mais d'après l'analyse présentée dans l'encadré 4, elles pourraient refléter, au moins en partie, des hypothèses différentes concernant les réactions des producteurs de charbon et de pétrole.

3.2. Réduire les coûts du Protocole de Kyoto : le recours aux mécanismes de flexibilité

Le scénario analysé dans la section précédente met en évidence des écarts importants entre les coûts marginaux de réduction dans les différents pays de l'Annexe 1. Cela suppose que les instruments de flexibilité fondés sur les lois du marché prévus par le Protocole sont susceptibles de réduire sensiblement les coûts induits par la réduction globale des émissions spécifiée par le texte. S'appuyant sur le chapitre 2, cette section examine les instruments de flexibilité et vise à quantifier leur potentiel de réduction des coûts économiques.

Les mécanismes envisagés par le Protocole peuvent être regroupés dans trois grandes catégories en fonction de la nature de l'option offerte⁵⁰ : i) flexibilité géographique, qui autorise les Parties à redistribuer les réductions d'émissions entre elles dans le but de minimiser les coûts ; ii) flexibilité temporelle, qui permet de répartir les réductions d'émissions dans le temps ; iii) flexibilité du type d'action, qui donne la possibilité, d'une part, de limiter à des degrés divers les émissions des six gaz visés et/ou, d'autre part, de renforcer les « puits » au lieu de réduire les émissions. De plus, le Protocole laisse les Parties libres de choisir les modalités de mise en œuvre nationales de la limitation des émissions qui leur est assignée, par exemple en appliquant des taxes ou en imposant des restrictions quantitatives. À cet égard, la présente section analyse également la possibilité, pour certaines Parties, de supprimer les subventions destinées au marché de l'énergie.

Flexibilité géographique

- Flexibilité géographique entre les Parties de l'Annexe 1

Les études existantes s'accordent à considérer que les échanges de droits d'émission et la « Mise en Œuvre Conjointe » sont susceptibles de réduire considérablement les coûts⁵¹. Ainsi, après avoir comparé les résultats de six modèles mondiaux, le « Energy Modelling Forum » (EMF) de l'Université de Stanford estime que les échanges internationaux feraient diminuer le coût induit par les objectifs de

⁵⁰

réduction globale des émissions de près de 60 pour cent. Il ressort du tableau 7 que la flexibilité géographique pourrait abaisser les coûts marginaux de plus de 50 pour cent. Les coûts moyens pourraient eux aussi baisser sensiblement. D'après les évaluations de Gielen et Koopman (1998), le commerce de permis serait susceptible de ramener le coût total de la mise en œuvre du Protocole, pour les Parties de l'Annexe 1, de 0.25 pour cent à 0.10 pour cent de la consommation réelle. Sur la base des résultats de simulations portant uniquement sur les États-Unis, Manne et Richels (1998) estiment que les coûts économiques passeraient de plus de 80 milliards de dollars (1 pour cent du PIB) à 50 milliards de dollars (aux prix de 1990 dans les deux cas), soit une réduction de plus de 40 pour cent⁵². Si l'on en croit les simulations effectuées avec le modèle GREEN, la perte totale de PIB pour les pays Membres de l'OCDE pourrait être réduite de plus d'un tiers (un peu moins dans le cas du revenu réel) et serait donc pratiquement insignifiante (aux alentours de 0.1 pour cent d'ici 2010, soit une perte quasiment identique à celle qui s'applique à l'ensemble des Parties de l'Annexe 1) (graphique 3, partie A). L'interprétation de ce résultat ne doit pas omettre qu'il reflète les gains très substantiels du commerce de permis mais aussi que les pertes, y compris en l'absence d'échanges, sont relativement faibles en raison, entre autres, de l'évolution favorable des termes de l'échange dans les pays Membres de l'OCDE, compte tenu de la diminution du prix des importations d'énergie.

Environ 80 pour cent des gains retirés des échanges sont imputables à l'amélioration de l'efficacité économique (la réduction des émissions de gaz à effet de serre intervient là où son coût est le plus faible, c'est-à-dire, concrètement, avant tout dans la CEI). Les autres gains sont dus au fait que les émissions agrégées des Parties de l'Annexe 1 sont plus élevées dans le cadre d'un système d'échanges de permis que si les pays atteignent leurs objectifs individuellement, la différence étant égale à l'écart entre le niveau des engagements et le niveau des émissions de la CEI dans le scénario de référence (« air chaud »). La réduction globale dans les Parties de l'Annexe 1 étant inférieure, le coût total s'en trouve réduit d'autant. Les scénarios simulés par le modèle GREEN indiquent qu'à l'horizon 2010, la CEI pourrait vendre quelque 130 millions de tonnes de carbone sous forme d'« air chaud » et environ 280 millions de tonnes supplémentaires sous forme de réductions effectives, ce qui ferait d'elle le principal vendeur sur le marché des permis (ce point est développé dans la sous-section 3.2.1.5 ci-après). En conséquence, les ventes de permis rapporteraient à la CEI 39 milliards de dollars (aux prix de 1995) (dont 12 milliards proviendraient de la vente d'« air chaud »), alors que la région enregistre des pertes en cas de mise en œuvre individuelle, du fait que les recettes de ses exportations d'énergie diminueraient.

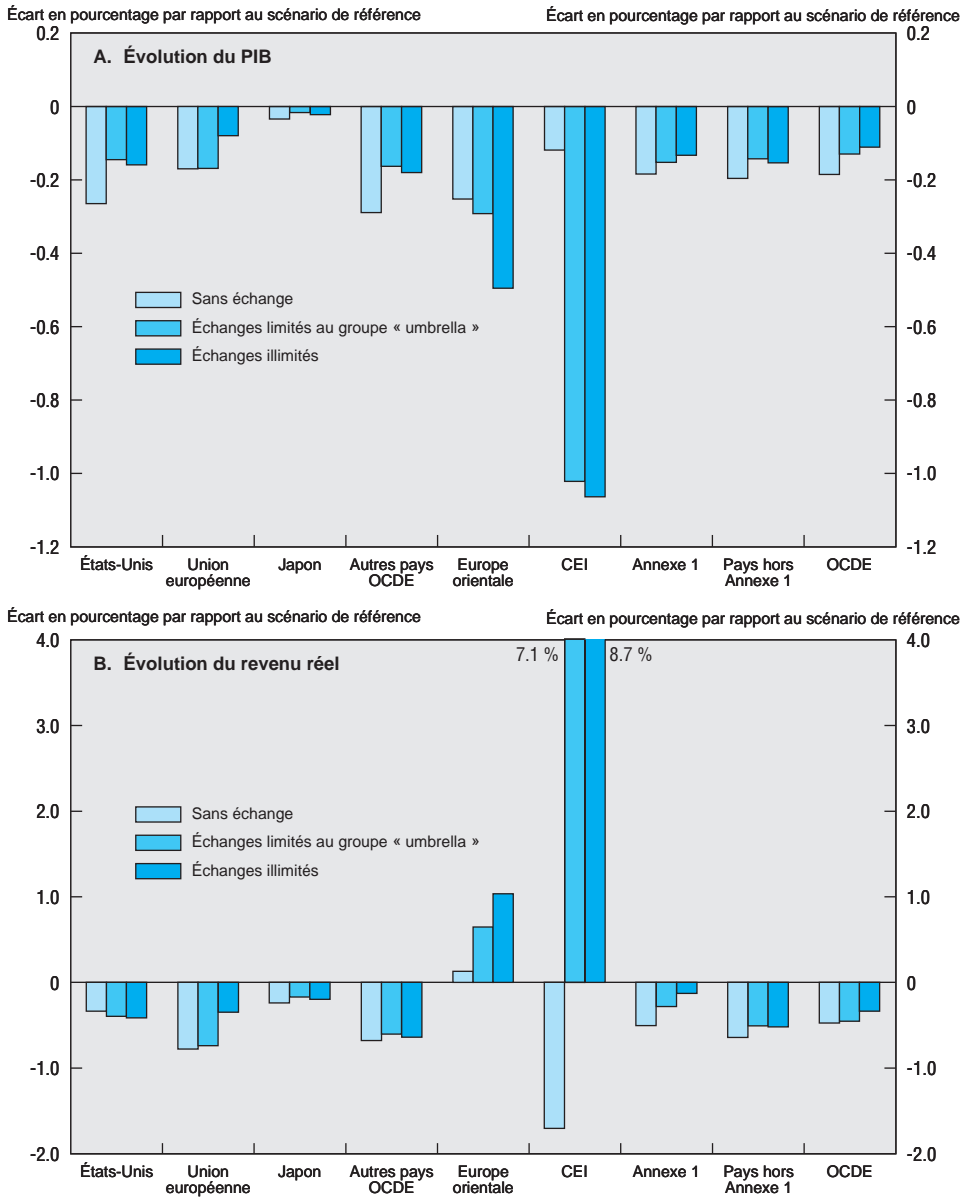
Il est indéniable que le commerce de permis limite sensiblement les coûts économiques totaux, mais la répartition des économies ainsi réalisées entre les Parties de l'Annexe 1 est plus ambiguë, en partie du fait qu'elle est fonction de

Tableau 7. Coûts marginaux de réduction avec et sans échanges de droits d'émission
 1995 \$ par tonnes de charbon

		Sans échanges	Avec échanges
États-Unis	WorldScan ¹	41	18
	CETA ¹²	191	51
	G-Cubed ²	82	57
	AIM ⁴	170	72
	RICE ¹⁰	148	72
	MS-MRT ⁷	272	82
	MIT-EPPA ⁸	216	82
	GREEN	231	90
	SGM ⁹	211	93
	GTEM ⁵	365	123
	Merge ³	304	154
	Oxford Model ⁶	464	247
Europe occidentale	WorldScan ¹	83	18
	G-Cubed ²	253	57
	AIM ⁴	226	72
	RICE ¹⁰	184	72
	MS-MRT ⁷	200	82
	MIT-EPPA ⁸	319	82
	GREEN	189	90
	SGM ⁹	452	93
	GTEM ⁵	760	123
	Oxford Model ⁶	1 077	247
Japon	WorldScan ¹	93	18
	G-Cubed ²	106	57
	AIM ⁴	266	72
	RICE ¹⁰	279	72
	GRAPE ¹¹	356	80
	MS-MRT ⁷	452	82
	MIT-EPPA ⁸	576	82
	GREEN	182	90
	SGM ⁹	411	93
	GTEM ⁵	733	123
	Merge ³	559	154
Oxford Model ⁶	1 213	247	

1. Les réductions des émissions et les coûts économiques sont tirés des travaux de Gielen et Koopmans (1998) ; les taxes sur le carbone sont tirées de Bollen, *et al.* (1998).
2. Le Global General Equilibrium Growth Model de l'Université nationale d'Australie, de l'Université du Texas et de l'Environment Protection Agency des États-Unis; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
3. Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reductions Policies, Stanford University et Electric Power Research Institute ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
4. L'Asian Pacific Integrated Model, National Institute for Environmental Studies (NIES-Japon) et de l'université de Kyoto ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9. Les chiffres pour les CEI sont tirés de l'étude de Kainuma *et al.*, OCDE, 1998, page 167.
5. Global Trade and Environment Model, Australian Bureau of Agriculture and Resource Economics (ABARE, Australie) ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9. Les chiffres pour la CEI et l'Europe orientale sont tirés de Tulpulé *et al.*, OCDE, 1998.
6. Oxford Economic Forecasting model ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
7. Multi-Sector, Multi-Region Trade Model, Charles River Associates et Université du Colorado ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
8. Emissions Projections and Policy Analysis Model, Massachusetts Institute of Technology ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
9. Second Generation Model, Battelle Pacific Northwest National Laboratory ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
10. Regional Integrated Climate and Economy Model, Université de Yale ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
11. Global Relationship Assessment to Protect the Environment Model, Institute for Applied Energy (Research Institute of Innovative Technology for Earth (Japon) et Université de Tokyo ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.
12. Carbon Emissions Trajectory Assessment Model, Electric Power Research Institute et Teisberg Associates ; estimations à partir de Weyant et Hill, 1999, graphiques 7, 8 et 9.

Graphique 3. Mise en œuvre du Protocole : variation du PIB et du revenu réel en fonction de différents régimes d'échange de permis, 2010



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

l'indicateur de coûts utilisé. Les résultats obtenus avec le modèle GREEN sont à cet égard révélateurs (graphique 3 et tableau 8). Par exemple, en termes de revenu réel, la CEI s'arrogerait plus de 60 pour cent des gains totaux dérivés du commerce de permis. En revanche, en termes de PIB, les gains bénéficieraient en majeure partie aux pays Membres de l'OCDE et la CEI enregistrerait un manque à gagner par rapport à la situation où les échanges ne seraient pas autorisés. Ces résultats contradictoires, dans le cas de la CEI, tiennent au fait que les recettes tirées des ventes de permis stimulent le revenu réel, tandis que l'appréciation du taux de change réel qui en résulte a un effet négatif sur le PIB. Plus généralement, cette divergence entre l'effet sur le PIB et les répercussions sur le revenu réel est liée à la répartition des revenus (dépenses) en provenance des ventes (achats) de permis et aux conséquences du commerce de permis sur les termes de l'échange⁵³. Les évaluations fondées sur le PIB indiquent en général une distribution des gains favorable aux acheteurs de permis (les États-Unis font figure de principal bénéficiaire au motif qu'ils achètent un grand nombre de permis – tableau 8, colonne 1). Celles qui s'appuient sur le revenu réel attribuent un avantage aux vendeurs (la CEI étant le principal bénéficiaire – tableau 8, dernière colonne).

Tableau 8. **Mise en œuvre du Protocole : répartition des gains et des pertes provenant des échanges de permis, 2010**
En pourcentage

	PIB	Revenu réel
Union européenne	59	36
Europe orientale	-9	4
CEI	-43	63
Japon	5	3
Autres pays de l'OCDE	17	1
États-Unis	71	-7
Pays de l'Annexe 1	100	100

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Les pays de l'Annexe 1 ne sont pas les seuls à tirer avantage des échanges de permis. Comme le montre le graphique 3, les pertes enregistrées par les autres pays sont légèrement moins élevées si ces pays échangent des permis que s'ils remplissent leurs engagements individuellement. Cela tient au fait que le commerce de permis modifie la structure de la diminution de la consommation d'énergie : la baisse des importations de pétrole est atténuée et la production de charbon de la CEI enregistre un recul plus prononcé. Par conséquent, les pays exportateurs de pétrole sont beaucoup moins affectés par la réduction des émis-

sions dans les pays de l'Annexe 1. Parallèlement, le taux de « fuites » serait probablement inférieur si les échanges de permis étaient utilisés que si le Protocole était mis en œuvre individuellement.

- Justification d'une éventuelle limitation de la flexibilité géographique

L'application sans restriction de la flexibilité géographique abaisse les coûts, mais soulève aussi un certain nombre de problèmes :

- Premièrement, les Parties visées à l'Annexe 1 ne sont pas toutes d'accord sur les modalités de réalisation des objectifs et certaines d'entre elles sont opposées, pour des motifs politiques, aux instruments fondés sur les lois du marché tels que le commerce de permis. A l'extrême, cela pourrait conduire certains pays ou groupes de pays à s'abstenir d'échanger des permis d'émission, ce qui risque d'entraîner une segmentation du marché plus ou moins prononcée (page 56).
- Deuxièmement, la proportion des échanges dans la réalisation des engagements pourrait engendrer des problèmes politiques. D'après le scénario où les possibilités d'échanges sont illimitées, les pays Membres de l'OCDE feraient appel dans une très large mesure à l'achat de permis pour remplir leurs obligations : par exemple, la proportion des réductions d'émissions obtenue grâce à l'achat de permis pourrait aller de 32 pour cent au Japon à 42 pour cent dans l'Union européenne. Cela pourrait donner à penser que les pays Membres de l'OCDE cherchent à substituer à la lutte contre la pollution des transferts de capitaux vers la CEI, ce qui pourrait être jugé contradictoire avec l'article 7 du Protocole, qui stipule que les échanges de droits d'émission viennent « *en complément* des mesures prises au niveau national pour remplir les engagements chiffrés de limitation et de réduction des émissions ». Ces craintes pourraient encourager l'adoption d'une limitation générale des échanges auquel chaque pays a droit. Ainsi, l'Union européenne propose de plafonner les achats de permis⁵⁴ (page 57).
- Troisièmement, dans l'éventualité où les réductions d'émissions liées à des échanges de permis ne seraient pas réalisées ou ne pourraient pas être vérifiées, la vente d'une forte proportion des droits attribués à la CEI à d'autres Parties visées à l'Annexe 1 (43 pour cent en 2010, d'après les simulations sur GREEN) risquerait d'entamer la crédibilité du Protocole. Plus généralement, les problèmes de mesure, entre autres difficultés de mise en œuvre discutées dans le chapitre 2, sont parfois invoqués pour justifier des limitations du commerce de permis.
- Quatrièmement, la grande quantité d'« air chaud » pourrait elle aussi engendrer un problème de crédibilité même si, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, le système de « mise en réserve » prévu par le Protocole implique

que ce phénomène aura peu d'impact sur le cumul des émissions à long terme.

- Cinquièmement, le fait que la CEI dans son ensemble puisse être le seul vendeur de permis d'émissions risque de l'amener à se conduire en monopole, ce qui diminuerait l'efficacité économique du marché des permis (page 61).
- Enfin, les pays en développement refusent généralement d'envisager des contraintes quantitatives limitant leur taux d'émissions par habitant à un niveau très inférieur à celui des pays développés, à moins que ces derniers n'acceptent de s'engager à réduire dans une certaine mesure leurs propres émissions. Si l'on considère ce principe comme acquis, il peut sembler fondé d'exiger des pays de l'Annexe 1 qu'ils assument plus que leur part de réduction d'émissions dans le but d'amener certains grands pays en développement à accepter des limites (voir le chapitre 4).

Dans ce contexte, les trois sous-sections suivantes examinent diverses possibilités de dérogation à la flexibilité géographique maximale et leurs effets sur les coûts économiques.

- Segmentation du commerce de permis

La segmentation du commerce de permis suppose que certaines Parties de l'Annexe 1 ne participent pas au système d'échanges général, bien qu'elles puissent procéder à des échanges entre elles au sein d'une zone séparée (scénario de la « double bulle »). Dans ce type de scénario, les coûts marginaux de réduction ne seraient pas identiques dans tous les segments du marché des permis. Les Parties qui seraient acheteurs nets dans le système d'échanges général mais qui ne souhaitent pas y participer doivent réduire leurs émissions dans une plus grande proportion en appliquant des mesures nationales et à un coût plus élevé. Les autres acheteurs nets sont avantagés, le prix des permis étant plus bas que dans le cadre d'un système d'échanges libres.

Le scénario de la « double bulle » a été simulé à l'aide de différents modèles, notamment en partant de l'hypothèse que les pays de l'Union européenne et d'Europe orientale ne participent pas au commerce de permis⁵⁵. Tous les résultats concordent : les gains d'efficacité sont moins importants si le commerce est segmenté que si tous les pays de l'Annexe 1 participent à un marché de permis sans restriction. D'après le modèle GREEN (scénario dit « Umbrella », graphique 3), limiter les échanges aux pays favorables au commerce de permis (Amérique du Nord, pays du Pacifique et CEI, rassemblés dans le groupe dit « umbrella ») réduirait de 40 pour cent les gains totaux des échanges en termes de revenu réel (par rapport au scénario du marché libre entre les pays de l'Annexe 1). Ces pertes sont concentrées dans l'Union européenne, qui renonce aux avantages qu'elle retirerait de

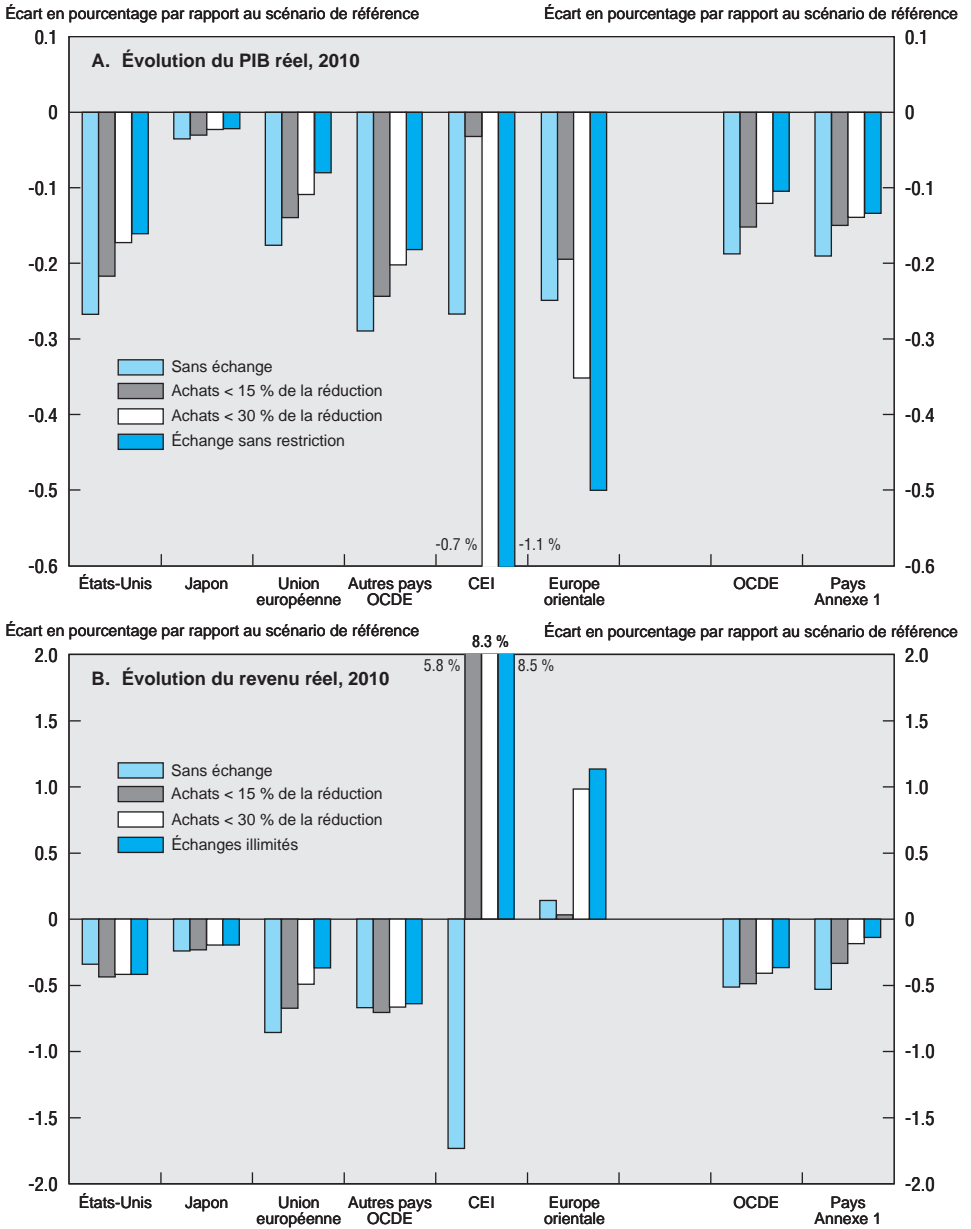
l'achat de permis, dans la CEI, qui vend moins de permis et à un prix inférieur, et en Europe orientale. En revanche, les gains des pays du groupe favorable au commerce de permis sont légèrement plus élevés que dans le scénario du marché libre, le prix des permis étant inférieur du fait que l'Union européenne, gros acheteur potentiel, est absente du marché. Ainsi, les Parties qui renonceraient à participer au commerce encourraient en général des coûts supérieurs et feraient bénéficier les autres de gains supplémentaires.

- Limitation des échanges

Le Protocole de Kyoto stipule que les échanges de droits d'émission doivent venir en complément des mesures prises au niveau national. Il en découle que la quantité de permis d'émissions que les Parties sont autorisées à acheter ou à vendre pourrait être plafonnée. La récente proposition de l'Union européenne (Union européenne, Conseil, 1999) fournit un exemple concret d'interprétation de la notion de complémentarité. Cette proposition vise à plafonner le volume des émissions que les pays de l'Annexe 1 pourraient échanger en vertu des trois mécanismes de flexibilité. Ces plafonds s'appliquent aux achats de permis et aux acquisitions nettes d'émissions dans le cadre de «projets», ainsi qu'aux ventes de permis et aux transferts nets d'émissions dans le cadre de «projets». Au stade actuel, il est très difficile de fournir une évaluation quantitative des répercussions de ces restrictions, y compris les effets sur les gains d'efficacité censés résulter du recours aux mécanismes de flexibilité⁵⁶. L'analyse qui suit n'a pas cette ambition ; elle vise seulement à illustrer l'impact des restrictions à la lumière des résultats présentés récemment dans la littérature et de quelques scénarios fictifs de plafonnement des achats et ventes de permis d'émissions.

Bollen *et al.* (1998) ont simulé des restrictions sur les achats de permis à l'aide du modèle WorldScan. Si l'on suppose que les achats de permis des pays de l'Annexe 1 ne peuvent pas dépasser 10 pour cent de leurs engagements chiffrés de limitation ou de réduction des émissions, tous les pays Membres de l'OCDE se voient rationnés et leurs coûts marginaux sont donc différents (dans une moindre mesure, cependant, que par rapport à une situation où les échanges sont nuls). Manne et Richels (1998) ont également simulé l'impact du plafonnement des achats de permis. Ils en ont déduit que si les acheteurs ne sont pas autorisés à satisfaire plus d'un tiers de leurs engagements de réduction par des achats de crédits d'émission, les pertes de PIB subies par les États-Unis sont deux fois plus élevées⁵⁷. D'après les simulations effectuées à partir du modèle GREEN, si le commerce de permis entre pays de l'Annexe 1 n'est pas limité, les pays Membres de l'OCDE achètent un grand nombre de droits d'émission à la CEI et aux pays d'Europe orientale. En 2010, ces achats représenteraient entre 30 et 40 pour cent des réductions des pays Membres de l'OCDE par rapport aux niveaux de référence. Le graphique 4 illustre les résultats de deux scénarios différents dans lesquels les

Graphique 4. Impact des limitations d'achats de permis

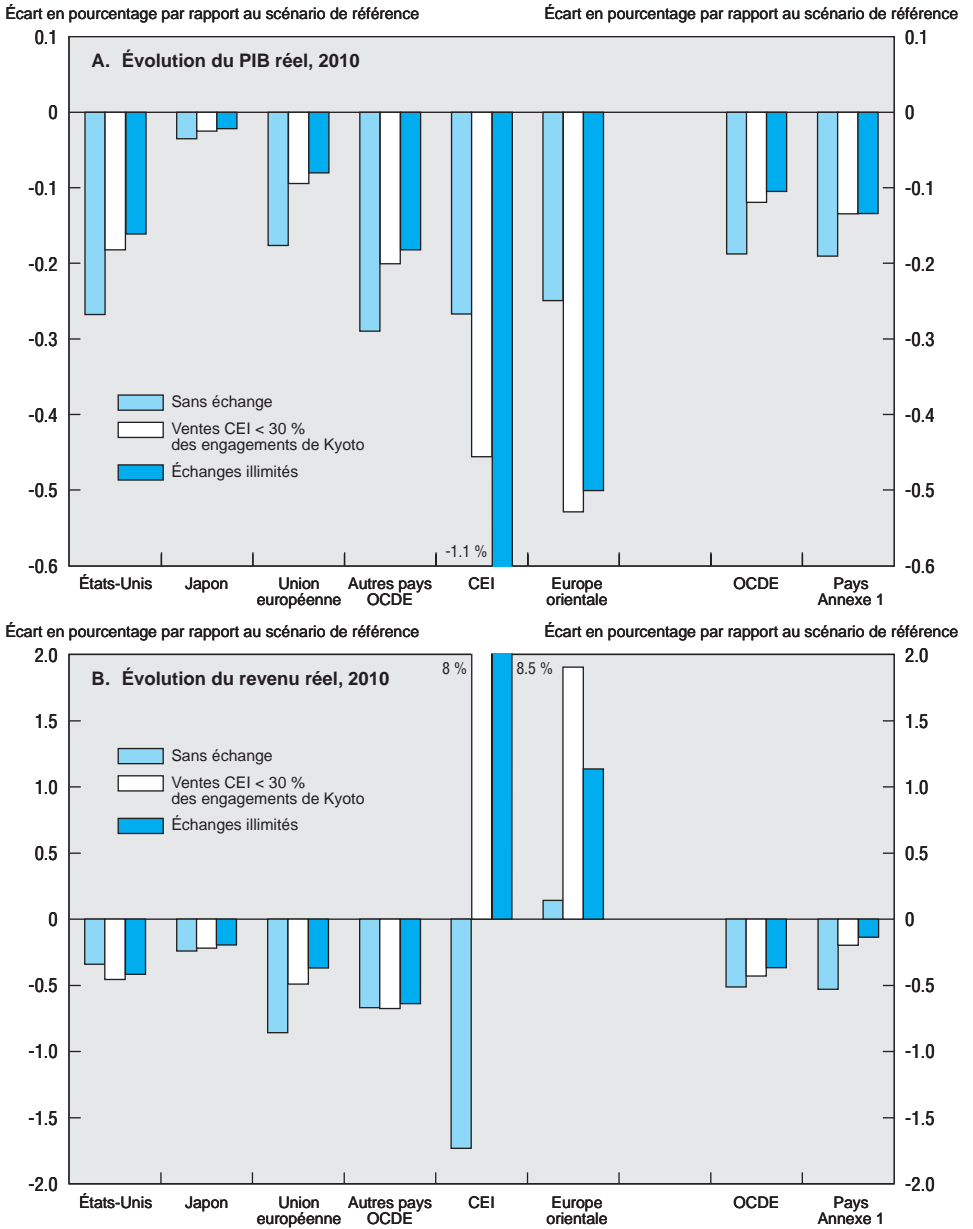


pays acheteurs ne peuvent pas satisfaire plus de 30 et 15 pour cent, respectivement, de leurs obligations de réduction au moyen des achats de permis⁵⁸. Le plafonnement à 30 pour cent a relativement peu d'effet sur l'économie de coûts liée aux échanges, car il ne réduit que marginalement les achats de permis⁵⁹. En revanche, le plafonnement à 15 pour cent divise par deux, pour l'ensemble des pays de l'Annexe 1, les gains attendus du commerce de permis⁶⁰.

Une limitation des ventes de permis des pays de l'Annexe 1 aurait globalement des répercussions comparables. Elle restreindrait les réductions dans les pays à faibles coûts et, en limitant la quantité de permis vendus à l'étranger, obligerait les pays où les coûts sont élevés à diminuer davantage leurs propres émissions. Il en résulterait une différenciation des coûts marginaux de réduction entre les pays de l'Annexe 1 et une réduction de l'efficacité globale du marché. D'après les résultats obtenus avec le modèle GREEN, si aucune entrave n'est mise au commerce de permis entre les pays de l'Annexe 1, la CEI vendrait l'équivalent de 43 pour cent de la totalité de ses engagements d'ici 2010. Limiter cette proportion à 30 pour cent n'aurait que de légères répercussions sur les pays de l'Annexe 1 dans leur ensemble, mais supposerait une réduction de 40 pour cent du gain des pays Membres de l'OCDE en termes de revenu réel (graphique 5)⁶¹. Si l'on se réfère à l'évaluation quantitative présentée dans OCDE (1999b), le plafond proposé par l'Union européenne serait un ordre de grandeur plus restrictif que celui qui est envisagé dans cette simulation, avec pour corollaire des répercussions proportionnelles sur les coûts économiques totaux⁶². Les restrictions devraient être probablement moins lourdes de conséquences si le « Mécanisme pour un Développement Propre » est pris en compte, dans la mesure où ce mécanisme limite le poids de la CEI dans les ventes de permis d'émissions.

La quantification des répercussions macroéconomiques du plafonnement est dans une large mesure subordonnée aux modalités de la répartition de la rente découlant des quotas. Si une Partie ne peut pas acheter des permis au-delà d'une certaine limite, il se peut qu'elle doive procéder à des réductions de ses propres émissions pour remplir ses obligations, auquel cas son coût marginal de réduction deviendrait supérieur au prix de transaction des permis. La demande de permis étant réduite, leur prix chute (par rapport à celui qui est atteint dans le scénario où les échanges ne sont pas restreints), ce qui bénéficie aux pays dont les achats ne sont pas limités. La différence entre le coût marginal de réduction dans les pays rationnés et le prix de transaction international des permis correspond à une rente. La répartition de celle-ci entre acheteurs et vendeurs est fonction du pouvoir de marché⁶³ de chacun d'eux et joue un rôle déterminant dans la distribution des effets sur le revenu réel entre les différents pays. Dans les scénarios décrits ci-avant, les vendeurs de permis sont censés s'arroger la rente car tout donne à penser que leur pouvoir de marché est supérieur à celui des acheteurs.

Graphique 5. Impact des limitations de ventes de permis



- Pouvoir de marché

Certains redoutent que, dans le contexte du Protocole de Kyoto, la CEI prise dans son ensemble ne devienne le principal fournisseur de permis négociables, voire le seul. Dans ces circonstances, si elle agissait en monopole parfait, elle fixerait le prix de transaction des permis de manière à optimiser à la fois le montant total des recettes tirées de leur vente et les coûts de réduction de ses propres émissions. La différence entre le prix auquel la CEI vend les permis et les coûts marginaux de réduction de ses propres émissions correspond à la rente qu'elle retire de sa position de force sur le marché. Ainsi, une fois de plus, la règle de l'égalisation des coûts marginaux de réduction n'est pas respectée et les acheteurs de permis sont contraints de réduire leurs émissions davantage que si les échanges étaient soumis à une concurrence parfaite (car le prix des permis étant plus élevé, ils en achètent moins), alors que les réductions d'émissions dans la CEI sont moins importantes (du fait qu'elle réserve un plus grand nombre de permis à son propre usage). Comme dans les cas précédents, cette segmentation du marché entraîne des pertes d'efficacité économique globale. Dans la pratique, et pour les raisons énoncées dans l'encadré 5, il est difficile de dire dans quelle mesure la CEI pourrait et souhaiterait tirer parti de sa situation de monopole. En tout état de cause, dans le cas extrême envisagé dans l'encadré 5, où la CEI serait à même d'exercer pleinement son pouvoir de marché, le prix des permis en 2010 serait plus élevé de 20 pour cent qu'en situation de concurrence parfaite et les gains retirés par les pays Membres de l'OCDE du commerce de permis seraient diminués d'un cinquième au moins (Burniaux, 1998).

- Flexibilité géographique impliquant le reste du monde

Le « Mécanisme pour un Développement Propre » autorise les Parties visées à l'Annexe 1 à comptabiliser dans la réalisation de leurs obligations pour la première période d'engagement (2008-2012) les réductions d'émissions obtenues dans le cadre de projets mis en œuvre dans les Parties hors Annexe 1, sous réserve que ces réductions soient « certifiées » (voir le chapitre 2). Dans le principe, les investissements qui relèvent du « Mécanisme pour un Développement Propre » sont régis par les mêmes incitations économiques que le commerce de permis : les investisseurs entreprendront des projets là où les coûts de réduction des émissions seront inférieurs (y compris dans leur propre pays). En ce sens, la distribution des réductions d'émissions résultant de ce mécanisme est efficace par rapport au coût. Cependant, il est difficile de chiffrer les effets du mécanisme. En premier lieu, les projets de ce type ne peuvent pas être modélisés de la même façon que le commerce de permis, car le « Mécanisme pour un Développement Propre », à la différence des échanges, fonctionne sans limitation des émissions dans le pays hôte. Les réductions sont obtenues grâce au remplacement des capacités existantes, dont le

Encadré 5. Importance du pouvoir de marché dans le commerce de permis d'émission

Les résultats des simulations relatifs aux effets du commerce de permis d'émission, tels qu'ils sont présentés dans cette publication, reposent sur l'hypothèse d'une concurrence parfaite sur le marché des permis. Cette hypothèse n'est pas nécessairement réaliste. Les doutes sur la perfection de la concurrence dans les échanges de permis sont liés à un résultat confirmé par presque toutes les simulations de la mise en œuvre du Protocole de Kyoto : le commerce de permis, dans les conditions définies par le Protocole, serait probablement dominé de manière écrasante par la Fédération de Russie et l'Ukraine (regroupées ici sous l'appellation CEI). Le graphique 6 montre la structure des échanges obtenus avec le modèle GREEN de l'OCDE : la CEI vendrait environ 450 millions de tonnes de carbone à l'horizon de la première période d'engagement et serait de loin le principal vendeur. Une partie non négligeable de ces ventes serait représentée par de l'« air chaud ». Les simulations supposant le maintien des objectifs de Kyoto sur une période plus longue montrent que la CEI resterait le principal fournisseur de permis jusqu'en 2030, date à laquelle les États-Unis deviendraient à leur tour un important vendeur de permis. Ainsi, les conditions sont réunies pour que la CEI exerce un pouvoir de monopole. Cet encadré fournit des estimations indicatives des effets sur le commerce de permis et sur les coûts de réduction, dans l'hypothèse extrême où la CEI serait à même de tirer parti pleinement de sa position de force sur le marché des permis.

Modélisation de la concurrence monopolistique sur le marché des permis négociables

L'approche suivie consiste à appliquer aux pays de l'Annexe 1 le modèle formulé par Hahn (1984), au niveau des entreprises. Elle se base sur l'hypothèse qu'un pays dominant est en mesure d'influencer le prix des permis. En cas de monopole, ce pays fixe le prix au niveau correspondant à la maximisation de la différence entre les recettes qu'il tire de ses ventes de permis et ses coûts de réduction. Les autres pays n'ont aucune influence sur ce prix, c'est-à-dire qu'ils minimisent leurs coûts de réduction/échanges compte tenu du prix déterminé par le pays dominant. Le prix de transaction est identique pour tous les permis (ils sont échangés comme s'il s'agissait d'un bien homogène). Le pays jugé en position de force est celui qui vend ou achète le plus de permis dans le scénario concurrentiel correspondant (où aucun pays n'a d'influence sur les prix du marché).

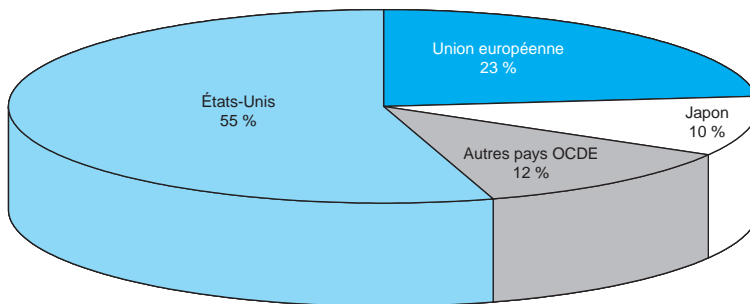
Les conditions de premier ordre du problème d'optimisation du pays en situation de monopole (pays 1 ci-après) conduisent à spécifier le prix de la transaction des permis (P) de la manière suivante (pour de plus amples détails, voir Burniaux, 1999) :

$$[1] \quad P = \frac{\left(L - \sum_{i=2}^m E_i(P) - E_1^0 \right)}{\sum_{i=2}^m E'_i(P)} - C'_1(E_1)$$

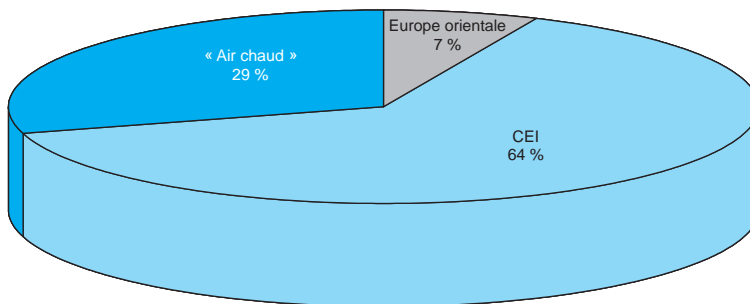
Encadré 5. **Importance du pouvoir de marché dans le commerce de permis d'émission)**

Graphique 6. **Échange de permis par pays/région conformément au Protocole de Kyoto, 2010**

A. Achats de permis par pays/région



B. Ventes de permis selon leur origine



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Encadré 5. **Importance du pouvoir de marché dans le commerce de permis d'émission** (suite)

Dans l'équation [1], le prix fixé par le pays en situation de monopole (ou de monopsonne) (P) est calculé en ajoutant une marge positive (ou négative) au coût marginal de réduction de ce pays – $C'_1(E_1)$. Cette marge est fonction des facteurs suivants :

1. L'excédent de demande de permis du pays 1 par rapport aux permis qui lui sont attribués initialement E_1^0 (tel qu'indiqué par le numérateur de la fraction de droite, les émissions du pays 1 étant obtenues par différence entre le quota total L et la somme des émissions des pays acheteurs 2 ... m). Dans le cas d'un monopole, cet excédent de demande est négatif.
2. L'inverse de la somme des dérivées premières des demandes de permis dans les pays acheteurs 2 à m ($E'_i(P)$ étant la dérivée première de la demande de permis (ou d'émissions) en fonction du prix des permis P dans le pays i).

L'équation [1] a les implications suivantes :

1. Si le pays qui fixe les prix n'utilise pas tous les permis qui lui sont attribués initialement, alors :

$$\left(L - \sum_{i=2}^m E_i(P) - E_1^0 \right) < 0.$$

Il vend les permis excédentaires à un prix *supérieur* à son coût de réduction marginal ($C'_1(E_1)$ et $E'_i(P)$ sont tous deux négatifs). Le pays qui détient le monopole vend moins de permis que s'il était en concurrence (mais à un prix supérieur) et ne réduit donc pas autant ses émissions.

2. Si le pays qui fixe les prix utilise plus de permis que l'allocation initiale, alors :

$$\left(L - \sum_{i=2}^m E_i(P) - E_1^0 \right) > 0.$$

Il achète des permis à un prix *inférieur* à ses coûts marginaux de réduction. Le pays en situation de monopsonne achète moins de permis que s'il était en concurrence (mais à un prix inférieur) et réduit donc plus ses émissions que dans la situation concurrentielle.

3. Compte tenu de (2) et (3), le coût de réduction total est toujours plus élevé que dans le scénario concurrentiel.
4. Le prix fixé par le pays dominant (et la perte qui en résulte pour l'économie par rapport à une situation de concurrence) dépend du nombre de permis qui lui sont attribués initialement (E_1^0 dans le numérateur du ratio de droite). Ainsi, la concurrence imparfaite implique que les aspects de distribution et d'efficacité globale ne sont pas indépendants. Autrement dit, les coûts peuvent être plus ou moins élevés selon la manière dont les droits d'émission sont attribués initialement. C'est une différence importante par rapport à la situation de concurrence, où le coût total de la réduction demeure identique quelle que soit l'attribution initiale des droits d'émission.

Encadré 5. **Importance du pouvoir de marché dans le commerce de permis d'émission** (suite)

5. L'écart entre le prix de transaction fixé par le pays dominant et son coût de réduction marginal est fonction de l'élasticité-prix de la demande de permis dans les autres pays. Ainsi, plus il est facile de substituer aux sources d'énergie à base de carbone des sources sans carbone (par exemple à partir du moment où des technologies alternatives sont disponibles), plus le pouvoir de marché du pays qui fixe les prix tend à diminuer.

Principaux résultats

Les simulations réalisées avec un modèle simplifié dérivé du modèle GREEN, dans lesquelles la CEI exerce son pouvoir de marché, indiquent qu'en 2010, le prix fixé par la CEI est supérieur de 21 pour cent à celui déterminé en concurrence parfaite (91 dollars de 1995 par tonne de carbone, contre 75 dollars). Le prix étant plus élevé, la CEI vend moins de permis et réduit ses émissions dans une mesure moindre que dans le scénario concurrentiel. Par conséquent, son coût marginal de réduction se situe en 2010 à moins de 30 dollars de 1995 par tonne de carbone, soit très en dessous du coût marginal en situation de concurrence parfaite et du prix auquel les permis sont vendus en situation de concurrence imparfaite. L'écart entre le prix de transaction fixé par la CEI et son coût marginal de réduction représente la marge sur les ventes de permis. Il traduit le pouvoir de marché de la CEI sur les échanges. Il correspond également à la différence entre le coût marginal de réduction dans la CEI et dans les autres pays de l'Annexe 1 (ceux-ci n'exerçant aucune influence sur les prix des permis réduisent leurs émissions jusqu'au point où leurs coûts marginaux sont égaux au prix des permis vendus par la CEI). En 2010, la marge atteint 178 pour cent (en d'autres termes, le prix fixé par la CEI est presque trois fois plus élevé que son coût marginal de réduction), puis diminue régulièrement par la suite (si l'on suppose que les objectifs de Kyoto demeurent inchangés).

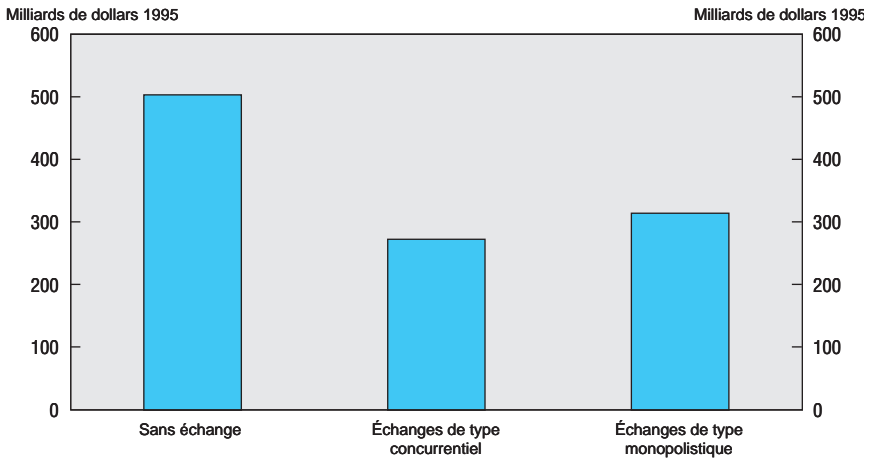
Si la concurrence est imparfaite, la réduction totale des émissions induit un coût plus élevé que si elle est parfaite. Cela tient au fait que la CEI (le pays où le coût est faible) ne réduit pas suffisamment ses émissions, alors que les autres pays de l'Annexe 1 (où le coût est élevé) les réduisent trop par rapport au scénario concurrentiel. Dans les pays Membres de l'OCDE, le coût total de la réduction des émissions est plus élevé que dans le scénario du commerce concurrentiel, mais il est beaucoup plus bas qu'en l'absence d'échanges (graphique 7). Ainsi, la manipulation des prix par la CEI contribuerait à réduire l'économie de coûts attendue du commerce de permis. En 2010, un marché concurrentiel de droits d'émission réduirait les coûts pour les pays Membres de l'OCDE de moitié ; par contre, si les prix sont déterminés par un monopole, cette économie de coût devrait être réduite d'un cinquième.

Résumé

Les résultats ci-dessus indiquent qu'en cas de monopolisation des échanges de permis, les gains d'efficacité totaux qui en découlent sont susceptibles de diminuer d'un cinquième environ. Toutefois, il est exclu que l'exercice d'un monopole annule totalement les gains en question. Cette analyse repose sur trois hypothèses

Encadré 5. **Importance du pouvoir de marché dans le commerce de permis d'émission** (suite)

Graphique 7. **Coût de réduction des émissions¹ pour les pays de l'OCDE² suivant différentes structures de marché, 2010**



1. Correspondant au coût marginal de réduction multiplié par le volume des émissions.

2. Y compris les pays d'Europe orientale.

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

importantes (et éventuellement discutables) quant à la configuration du marché des permis : premièrement, les échanges de la CEI sont centralisés au lieu d'être sous le contrôle individuel des pays qui la composent ou de leurs entreprises ; deuxièmement, dans les autres pays de l'Annexe 1, les échanges sont effectués individuellement par des entreprises qui n'ont pas de pouvoir de marché ; et troisièmement, la CEI ne tient pas compte des effets de l'exercice de son monopole sur les prix de l'énergie et donc sur ses termes de l'échange*. En outre, il est supposé que les entreprises n'ont pas de pouvoir sur le marché des biens. Il peut sembler peu probable que le commerce de permis dans le cadre du Protocole de Kyoto obéisse fidèlement à cette configuration particulière. Il convient donc, *a priori*, de considérer les résultats comme une estimation maximale de la perte d'efficacité économique que pourrait engendrer la manipulation des prix si la CEI exerçait son monopole dans les échanges de permis.

* Dans les simulations, la réduction globale des émissions est donnée. Cependant, le prix des permis influencera la structure de la demande de combustibles dans chaque pays et donc le prix relatif des différents types d'énergie. Les termes de l'échange de la CEI, qui exporte principalement du pétrole et du gaz, pourraient s'en trouver modifiés.

financement est assuré en totalité ou en majeure partie par un investisseur issu d'une Partie de l'Annexe 1, et le coût de l'utilisation de l'énergie dans le pays hôte n'augmente pas comme il le ferait dans le cas des échanges de permis. Par conséquent, le « Mécanisme pour un Développement Propre » est plus susceptible de donner lieu à des « fuites de carbone » que les échanges de permis (Bollen *et al.*, 1998). En second lieu, il est très difficile d'estimer dans quelle mesure le potentiel de ce mécanisme sera effectivement utilisé. De ce fait, les évaluations de son impact ne servent pour l'instant qu'à illustrer son principe.

Le potentiel du « Mécanisme pour un Développement Propre » est parfois évalué en partant tout d'abord de l'hypothèse que la réduction totale des émissions stipulée par le Protocole est répartie dans le monde entier grâce à un système global d'échanges de permis. On en déduit une estimation maximale du potentiel du mécanisme à réduire les coûts de réduction des pays de l'Annexe 1. Selon le modèle Merge, sous l'effet de ce système mondial d'échanges, la diminution du PIB des États-Unis atteindrait seulement un quart de son niveau en l'absence de commerce (Manne et Richels, 1998). L'application sans restriction du « Mécanisme pour un Développement Propre », telle que simulée par le modèle GREEN, imputerait 80 pour cent des réductions d'émissions décidées à Kyoto aux pays hors Annexe 1, ce qui ramènerait le coût global, pour les pays de l'Annexe 1, à près de zéro et le prix des permis à 10 dollars par tonne de carbone, aux prix de 1995 (au lieu de 200 dollars en moyenne pour les coûts marginaux en l'absence des mécanismes de flexibilité et de 90 dollars si le commerce de permis et la « Mise en Œuvre Conjointe » sont utilisés). Cependant, compte tenu des difficultés pratiques de mise en œuvre du mécanisme et des certifications des réductions d'émissions nécessaires dans le cadre des projets qui en relèvent, il est peu probable que son potentiel, au demeurant très grand, puisse être entièrement exploité. Les études existantes évaluent ces limites en plafonnant à un niveau arbitraire les droits d'émission pouvant être obtenus par l'intermédiaire de projets relevant du mécanisme (10 pour cent dans Bollen *et al.*, 1998 ; 15 pour cent dans Manne et Richels, 1998 ; 20 pour cent dans Administration des États-Unis, 1998). D'après les résultats fournis par Bollen *et al.*, 1998 et Administration des États-Unis, 1998, si le « Mécanisme pour un Développement Propre » s'ajoute à un système général d'échanges de permis entre pays de l'Annexe 1⁶⁴, la réduction des coûts qui lui est imputable, compte tenu des restrictions indiquées ci-dessus, est relativement marginale. Selon ces scénarios, la plupart des projets de ce type seraient entrepris en Chine.

Flexibilité temporelle

L'horizon temporel dans lequel s'inscriront les réductions d'émissions décidées à Kyoto fait lui aussi peser des incertitudes sur l'évaluation des coûts économiques. En fixant la première période d'engagement en 2008-2012, le Protocole

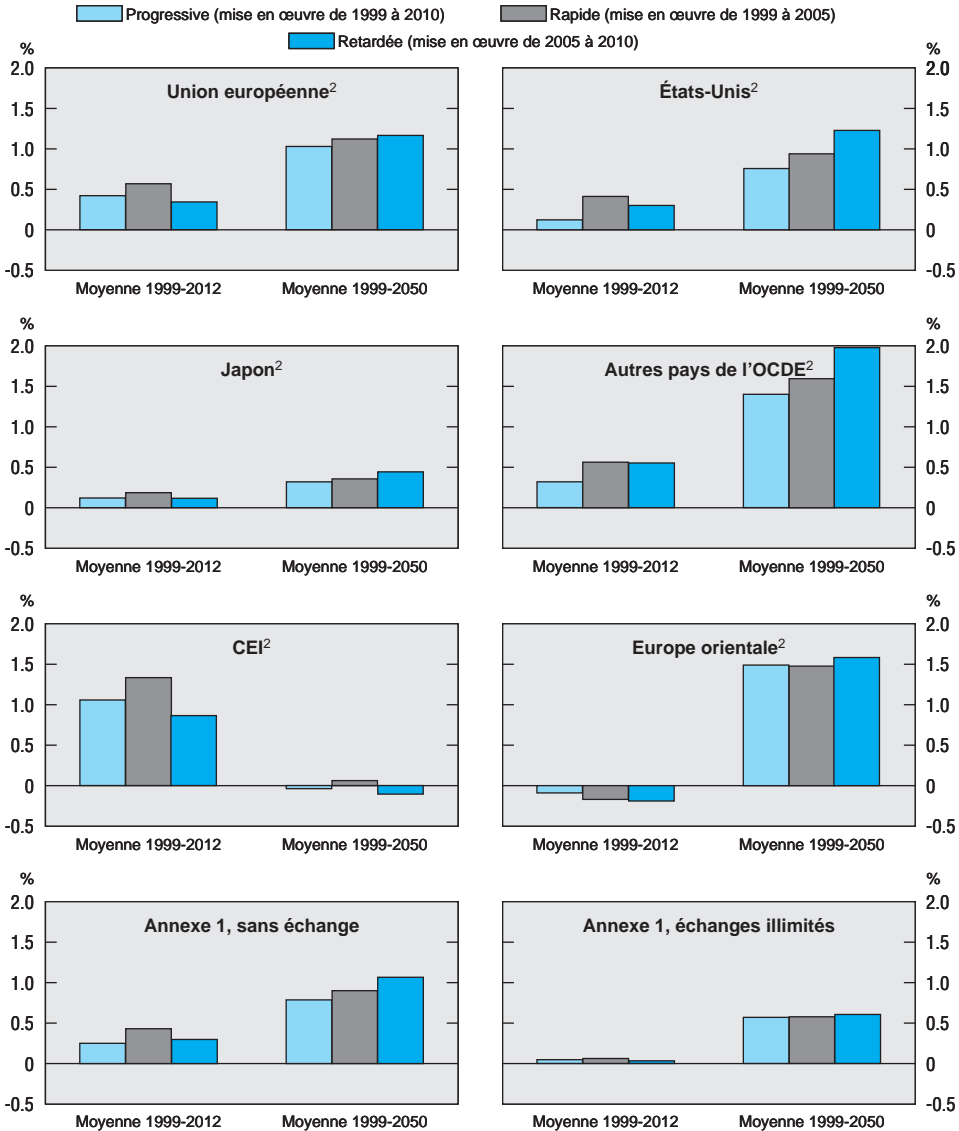
visait à donner assez de temps aux Parties pour qu'elles puissent adopter des stratégies de réduction des émissions progressives et crédibles. Le fait que les objectifs soient indiqués en termes d'émissions moyennes sur une période de cinq ans (2008-2012) constitue un élément de flexibilité supplémentaire. De plus, compte tenu de la possibilité de constituer des « réserves d'émissions », la possibilité qu'une Partie réduise ses émissions au-delà des objectifs de Kyoto est prise en considération dans le calcul des quantités attribuées ultérieurement. Face à ces dispositions propices à la crédibilité et à l'engagement, il convient de rappeler que de nombreux aspects du Protocole demeurent indéterminés. Cet élément d'incertitude, ajouté au retard pris dans la ratification du Protocole, peut encourager les Parties à attendre avant de procéder à de réels ajustements. Les détails de la mise en œuvre des mécanismes de flexibilité ne seront pas connus avant la sixième réunion de la Conférence des Parties, qui doit se tenir à la fin de l'an 2000. Le Protocole en lui-même n'entrera en vigueur qu'à partir du moment où une majorité des signataires l'auront ratifié⁶⁵. Or, le processus de ratification risque de prendre un certain temps dans quelques pays⁶⁶. Ainsi, le Protocole entrera en vigueur au plus tôt en 2001, ce qui ne signifie pas que tous les problèmes de procédure, tels que la mise sur pied des instances de comptabilisation et de vérification nécessaires, auront été résolus à cette date.

La flexibilité temporelle prévue par le Protocole suppose que les Parties sont, dans une certaine mesure, libres de définir un calendrier de réalisation des objectifs efficace en termes de coût. Tout d'abord, les coûts de réduction peuvent diminuer au fil du temps, à mesure que de nouvelles sources d'énergie bon marché produisant peu ou pas d'émissions de carbone deviennent disponibles. Cet argument plaide en faveur d'un report des mesures de réduction aux dernières années de la période couverte par le Protocole. En revanche, retarder les interventions accroît l'effort qu'il conviendra de fournir pour amener les émissions au niveau stipulé. Par ailleurs, étaler les réductions sur une période plus longue réduirait les coûts, en limitant la suppression « prématurée » des capacités existantes (bien que des ajustements intervenant plus tard, s'ils sont crédibles et prévisibles, soient également susceptibles d'atténuer le problème). De même, si l'on considère l'hypothèse que le développement technologique est endogène, une action précoce peut contribuer à abaisser le coût des efforts consentis ultérieurement. Enfin, l'étalement des réductions d'émissions dans le temps est susceptible de renforcer la crédibilité des mesures prises ultérieurement.

Le modèle GREEN ne reflète que certains de ces aspects⁶⁷. Néanmoins, à des fins d'illustration, il a été utilisé pour simuler trois chronologies différentes, en vue d'atteindre les objectifs du Protocole : i) dans un premier scénario, les réductions d'émissions sont étalées de manière linéaire sur la période 2000-2010 ; ii) dans le deuxième, les objectifs de Kyoto sont atteints grâce à des mesures précoces étalées sur la période 2000-2005 ; iii) dans le troisième, les engagements sont remplis grâce à des actions tardives mises en œuvre pendant la période 2005-2010 (graphique 8). Quelle que soit la région, étaler les efforts sur une longue période se

68

Graphique 8. Mise en œuvre du Protocole : coûts selon différentes chronologies
 Pertes moyennes de revenu réel annuel actualisé¹, en pourcentage



1. Taux d'actualisation de 3 %.

2. En l'absence d'échange de permis.

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

traduit par les coûts les moins élevés. La concentration des réductions sur des périodes courtes engendre de toute évidence des coûts supplémentaires, liés au remplacement accéléré des capacités existantes. Si l'on s'en tient à l'horizon temporel envisagé par le Protocole, l'action précoce et rapide entraîne les coûts les plus élevés. Cela tient au fait qu'une partie des coûts liés à une action tardive et rapide se manifeste après l'horizon temporel du Protocole. En effet, si l'on se réfère aux coûts encourus jusqu'en 2050, à supposer que les limitations définies à Kyoto soient maintenues au-delà de 2012, l'action tardive étalée sur une période de cinq ans apparaît sans ambiguïté comme la solution la plus coûteuse. Certains pays tels que les États-Unis doivent appliquer des taxes sur le carbone très élevées pour remplir leurs engagements à temps, ce qui donne à penser que ce dernier scénario risque de ne pas être réalisable en pratique, compte tenu des solutions technologiques disponibles⁶⁸. Si l'on s'en tient à ces résultats, dans le contexte du Protocole, réduire les émissions progressivement et sans tarder minimise les coûts agrégés dans le temps. Ces résultats sont dans une très large mesure subordonnés au choix du niveau de préférence intertemporelle⁶⁹. L'incapacité du modèle à tenir compte des anticipations des agents et des changements technologiques endogènes peut avoir des conséquences plus grandes encore. En vertu de quoi il convient de n'accorder qu'une valeur illustrative aux résultats.

Flexibilité des modalités de mise en œuvre

La flexibilité des modalités de mise en œuvre renvoie au fait que les Parties ont le choix entre différents instruments en vue de remplir leurs engagements. Cependant, le Protocole stipule que les Parties, pour s'acquitter de leurs engagements chiffrés de limitation des émissions, doivent appliquer et/ou élaborer plus avant des politiques et des mesures de réduction ou de suppression graduelle des imperfections du marché qui vont à l'encontre de son objectif (article 2, v). Cela concerne en particulier la suppression des subventions à la consommation d'énergie. Parmi les pays de l'Annexe 1, certaines économies en transition subventionnent depuis longtemps très largement la consommation de combustibles fossiles. En dépit des réformes entreprises dernièrement, ces subventions demeurent dans certains cas élevées. Ainsi, une étude de la Banque mondiale (1997) fait état de taux de subvention aux alentours de 30 pour cent en 1995 dans la CEI et les pays d'Europe orientale.

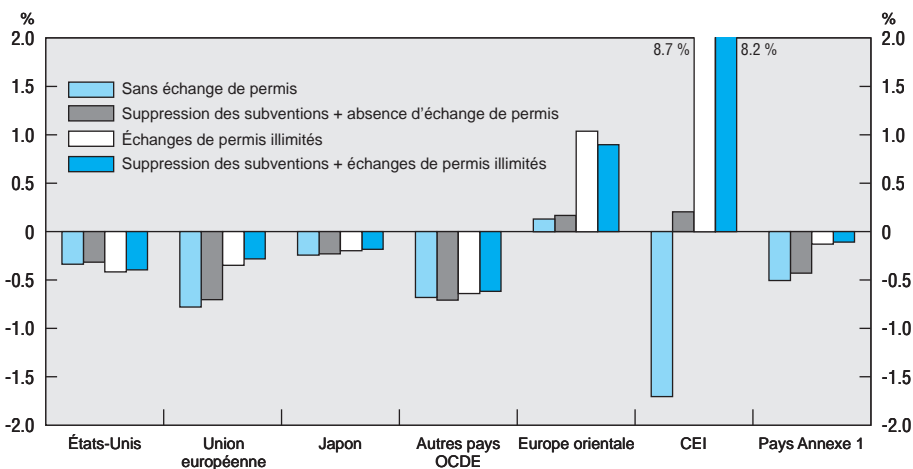
La suppression des subventions à l'énergie constitue une mesure dite « sans regrets » dans la mesure où, au-delà de l'intérêt environnemental que présente la réduction des émissions de gaz à effet de serre, elle présente des avantages économiques (bien qu'elle implique des effets sur la répartition des revenus et des coûts d'ajustement). La distorsion des prix engendre des pertes d'efficacité économique dans la mesure où producteurs et consommateurs prennent leurs décisions sur une base qui ne rend pas compte du coût d'opportunité économique de certai-

nes ressources. Il s'ensuit que le coût de mise en œuvre du Protocole de Kyoto diminuerait si l'on éliminait les subventions éxistantes à la consommation d'énergie dans la CEI et les pays d'Europe orientale. Cependant, les gains ne seraient pas limités aux États où elles seraient supprimées. Premièrement, dans le cas de la CEI, en faisant diminuer la consommation d'énergie, la suppression des subventions augmenterait la quantité de permis que la région pourrait vendre aux autres pays de l'Annexe 1, dans l'hypothèse où les permis seraient négociables. Deuxièmement, une réforme rapide du système de subventions dans les économies en transition ferait baisser les prix de l'énergie sur le marché international, ce qui améliorerait les termes de l'échange des Parties de l'Annexe 1, dont les coûts induits par la réalisation des objectifs seraient donc en partie compensés.

Les simulations du modèle GREEN confirment que la suppression des subventions en faveur des combustibles fossiles réduit les coûts économiques agrégés des pays de l'Annexe 1 pris dans leur ensemble (graphique 9 et tableau 9). Les gains d'efficacité sont cependant bien moindres que ceux qui découleraient de la possibilité d'échanger des droits d'émission. En présence comme en l'absence d'échanges de permis, l'élimination des subventions dans la CEI et les pays d'Europe orientale est susceptible de faire diminuer d'environ 15 pour cent la perte totale en termes de revenu réel des pays de l'Annexe 1 (elle passerait de 27 à

Graphique 9. Mise en œuvre du Protocole : impact des subventions à l'énergie sur les coûts, 2010

Variation du revenu réel par rapport au scénario de référence



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Tableau 9. Répartition des variations du revenu réel à la suite de la suppression des subventions à l'énergie, en 2010

En pourcentage

	Sans échanges de permis	Avec échanges de permis
États-Unis	-8.5	34.2
Union européenne	41.5	108.3
Japon	3.3	16.2
Autres pays OCDE	2.2	8.6
Europe orientale	3.8	-12.1
CEI	57.7	-55.2
Pays de l'Annexe 1	100.0	100.0

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

23 milliards de dollars de 1995 avec les échanges de permis et de 107 à 91 milliards de dollars de 1995 sans les échanges de permis).

La distribution des gains retirés de la réforme des marchés de l'énergie dans la CEI et en Europe orientale varie sensiblement selon qu'il existe ou non un commerce de permis. En son absence, la CEI est le principal bénéficiaire (elle s'arroge 58 pour cent des gains). Cependant, les pays Membres de l'OCDE profitent également de retombées indirectes positives importantes, en particulier du fait de la baisse des prix de l'énergie (le Japon, l'Union européenne et les États-Unis se partagent 44 pour cent des gains ; voir tableau 9). S'il y a commerce de permis et si les échanges s'opèrent dans des conditions de concurrence, les gains d'efficacité retirés de la suppression des subventions dans la CEI sont entièrement « exportés » vers les autres pays de l'Annexe 1, dans la mesure où la CEI vend plus de permis (484 millions de tonnes de carbone au lieu de 440 millions si les subventions sont maintenues). Néanmoins, ces permis ne présentent aucun avantage pour la CEI. En effet, la demande totale de permis demeurant inchangée, l'offre supplémentaire fait diminuer leur prix, de sorte que les revenus que la CEI tire de leur vente sont légèrement moins élevés que dans le scénario qui ne prévoit pas la suppression des subventions.

Donc, d'après ces résultats, la suppression des subventions à l'énergie en vigueur dans les économies en transition est susceptible de réduire encore les coûts de la réduction des émissions. Les gains d'efficacité ne profiteraient pas uniquement aux pays qui entreprennent une réforme. Au contraire, ils seraient répartis entre tous les pays Membres de l'OCDE, en particulier les États-Unis et l'Union européenne. En fait, dans certaines conditions, les avantages pour les pays susceptibles d'adopter une réforme sont si modestes que l'on peut se demander s'ils constituent une réelle incitation.

Flexibilité du choix des types d'émissions et des « puits »

Cette flexibilité renvoie au fait que les Parties concernées peuvent choisir le ou les gaz sur lesquels elles font porter leurs efforts de limitation des émissions et au fait qu'elles peuvent décider de recourir ou non à des « puits ». Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, le Protocole porte sur six gaz à effet de serre différents et les Parties sont laissées libres de compenser l'augmentation des émissions de l'un d'entre eux, en équivalent carbone, par la diminution des émissions d'un autre⁷⁰. Il peut exister des écarts non négligeables entre les coûts de réduction moyens d'un gaz à l'autre (ce qui suppose que des gains d'efficacité importants peuvent être obtenus si l'on procède à une égalisation de ces coûts marginaux en agissant sur un gaz plutôt que sur un autre). En outre, le Protocole prend en considération les variations nettes des émissions liées à la foresterie et résultant d'actions entreprises après 1990. En l'occurrence, les Parties ont la possibilité de recourir au reboisement s'il se révèle moins coûteux que la réduction des émissions dues, par exemple, aux activités industrielles.

A ce jour, les données fournies par la littérature au sujet des économies potentielles induites par ces deux possibilités restent lacunaires. D'après les informations dont dispose le Secrétariat de l'OCDE, très peu de modèles permettent de prendre en considération les autres gaz à effet de serre de manière exhaustive⁷¹. Gielen et Kram (1998) estiment que ces autres gaz représentent actuellement 21 pour cent des émissions totales d'équivalent CO₂ en Europe. Selon les prévisions, ce pourcentage devrait diminuer jusqu'en 2010. Cette même source indique que la diminution autonome de ces émissions au fil du temps pourrait réduire de 25 pour cent la réduction correspondante des émissions de CO₂ nécessaire pour atteindre l'objectif assigné à l'Union européenne d'ici 2010. Par ailleurs, Gielen considère qu'une réduction supplémentaire des émissions de gaz autres que le CO₂ peut être obtenue à un coût relativement bas (25 écus par tonne d'équivalent CO₂). Les résultats du modèle GTEM (Brown *et al.*, 1999) montrent que la prise en compte du méthane (CH₄) et de l'oxyde nitreux (N₂O) permettrait de réduire le coût marginal des réductions nécessaires pour atteindre les objectifs de Kyoto d'un tiers. A supposer que ces résultats se révèlent robustes, les coûts induits par la réalisation des objectifs du Protocole de Kyoto pourraient être sensiblement moins élevés que ne le suggère la présente publication. Cependant, il conviendra de réduire considérablement les incertitudes qui pèsent sur la mesure des émissions de gaz autres que le CO₂. Tant que des progrès n'auront pas été accomplis dans ce domaine, le commerce de permis sera difficile à mettre en œuvre, notamment en ce qui concerne les ventes des pays où les gaz autres que le CO₂ représentent une proportion importante des émissions totales.

Le potentiel de séquestration et les effets économiques des « puits » de carbone n'ont pas encore été évalués de manière systématique. Les émissions de carbone

liées aux changements d'affectation des terres représentent actuellement 1.6 gigatonnes par an, contre 6 gigatonnes attribuées à la consommation de combustibles fossiles. Ralentir le recul et la dégradation des forêts existantes permettrait de réduire considérablement les émissions de CO₂, mais ce potentiel se trouve principalement dans les zones tropicales et non dans les pays de l'Annexe I. De plus, le boisement/reboisement n'est pas à même de modifier substantiellement la quantité de carbone séquestré au-dessus du sol avant la première période d'engagement. En effet, comme l'indique Nilsson et Schopfhauser (1995), l'impact d'un boisement/reboisement massif n'aurait pas d'effet important avant quarante ou cinquante ans. En résumé, le potentiel de séquestration associé au renforcement des « puits » de carbone sera probablement négligeable pour la période sur laquelle porte le Protocole de Kyoto, mais il pourrait augmenter si la durée du Protocole était prolongée et si le nombre de pays concernés était accru.

4. Au-delà de la première période d'engagement : extension du Protocole de Kyoto dans le temps et dans l'espace

Ce chapitre analyse l'ampleur et les modalités de l'action nécessaire pour parvenir à une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Après une analyse qui démontre la nécessité d'agir à l'échelon mondial pour atteindre l'objectif visé, il montre comment les efforts pourraient être partagés entre les pays de manière à obtenir un consensus international.

4.1. Implications à long terme du Protocole de Kyoto

Le chapitre précédent mettait l'accent sur diverses implications du Protocole de Kyoto jusqu'à la première période d'engagement (2008-2012). Très peu d'études fournissent une évaluation chiffrée du Protocole au-delà de cette période. Au stade actuel, ce type d'évaluation est très spéculative car elle dépend d'hypothèses concernant les objectifs à long terme, sur lesquels la version actuelle de l'accord ne donne pas d'indications. Malgré ces éléments d'incertitude, il importe d'analyser le Protocole à la lumière de l'objectif à long terme de la Convention-cadre, qui est de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre. La présente section décrit les implications d'une éventuelle prorogation du Protocole de Kyoto consistant à maintenir les objectifs assignés aux Parties de l'Annexe I au-delà de 2012, les autres pays n'ayant pas l'obligation de prendre des initiatives pour limiter leurs émissions. Il ressort de ce scénario qu'à long terme, les coûts induits par le maintien des engagements pris à Kyoto seraient susceptibles de croître, alors que la capacité des échanges de droits d'émission à les réduire irait en diminuant. Parallèlement, sur la base d'une spécification simplifiée de la relation entre les émissions de CO₂ et les concentrations dans l'atmosphère, il semble que la limitation des émissions des pays de l'Annexe I aux

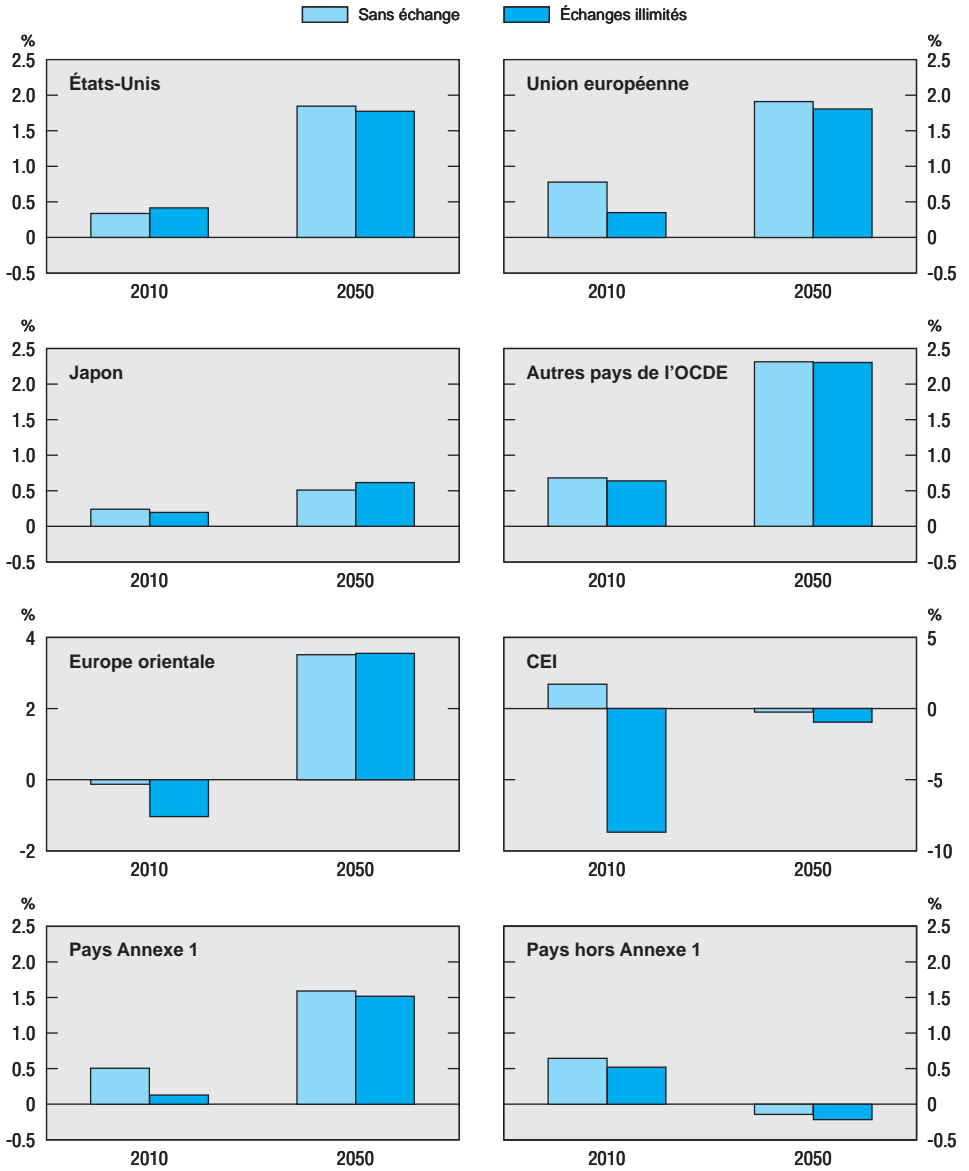
niveaux prévus par le Protocole soit très insuffisante pour provoquer une stabilisation des concentrations. Tel est le constat sur lequel s'appuient les sections suivantes, consacrées aux problèmes que soulève la conclusion d'un accord global destiné à stabiliser les concentrations dans l'atmosphère. L'analyse présentée dans cette section et les suivantes porte exclusivement sur le CO₂, les informations sur les autres gaz à effet de serre étant très lacunaires.

Coûts induits à long terme par les objectifs du Protocole de Kyoto

Le graphique 10 rend compte des pertes en revenu réel enregistrées en 2050 par rapport au scénario de référence, dans l'hypothèse où les pays de l'Annexe 1 empêchent individuellement leurs émissions de dépasser les niveaux d'objectif définis dans le Protocole. Pour l'ensemble de la zone couverte par l'Annexe 1, la perte de revenu réel atteint 1.5 pour cent par an (contre 0.5 pour cent en 2010). Les coûts économiques augmentent dans tous les pays, mais ce sont l'Europe orientale et la CEI qui sont les plus touchées. Le scénario de référence prend en considération l'existence de nouvelles sources d'énergie, ce qui contribue à accroître les coûts. D'après les prévisions, en 2050, les schistes bitumeux à forte teneur en carbone seraient moins chers que le pétrole brut dans le scénario de référence. Appliquée dans ce contexte, une taxe sur le carbone (ou encore un système de permis négociables) devrait se traduire par une hausse de prix plus forte pour les schistes bitumeux (dont la teneur en carbone est plus élevée) que pour le pétrole brut. Dès lors, le report de la demande sur le pétrole et l'augmentation résultants du prix mondial de cette source d'énergie entraîneraient une détérioration des termes de l'échange des pays de l'Annexe 1. La situation des exportateurs d'énergie s'inverserait par rapport à celle de 2010, puisqu'ils enregistreraient quant à eux un gain.

Contrairement à ce qui se passe pendant la première période d'engagement, les échanges de permis d'émission entre les pays de l'Annexe 1 ne réduiraient pas sensiblement les coûts agrégés, en 2050. Ce phénomène a deux explications, toutes deux liées à l'hypothèse selon laquelle, d'ici 2050, les sources d'énergie de substitution (aussi appelées « technologies alternatives ») sont disponibles au même prix dans tous les pays. Premièrement, en nivelant les coûts marginaux de réduction des différents pays, les énergies alternatives réduisent à long terme les possibilités de gains d'efficacité offertes par le commerce de permis. Deuxièmement, les avantages retirés des échanges de permis s'évanouissent à mesure que le rendement des réductions augmente dans les pays où les coûts sont élevés (ceux-là même où les énergies alternatives sont compétitives) et diminue dans ceux où les coûts sont bas et qui continuent d'utiliser les sources d'énergie classiques caractérisées par des rendements de réduction décroissants (voir l'Annexe I).

Graphique 10. **Coût à long terme du maintien des objectifs de Kyoto**
Variation du revenu réel en % par rapport au scénario de référence



Impact sur les concentrations de gaz à effet de serre

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) prévoit de « stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropogénique dangereuse du système climatique ». Néanmoins, le texte ne précise pas le niveau de concentration correspondant à ce seuil. Du reste, la communauté scientifique n'a pas déterminé ce niveau non plus. Cependant, on retient souvent le chiffre de 550 ppmv de CO₂ comme objectif de stabilisation d'ici la fin du XXI^e siècle, ce qui correspond à peu près à deux fois la concentration de CO₂ avant l'ère industrielle⁷². Selon les prévisions présentées dans le Deuxième rapport d'évaluation du GIEC, il faudrait que les émissions mondiales soient ramenées très en deçà de leur niveau actuel pour stabiliser la concentration de CO₂ à 550 ppmv d'ici la fin du siècle prochain (GIEC, 1996).

On peut se demander si les réductions décidées à Kyoto sont compatibles avec une stratégie de stabilisation de la concentration en deçà de 550 ppmv ou bien si cet objectif n'est pas d'ores et déjà hors d'atteinte. Une étude récente du GIEC (Wigley, 1997) montre que des limitations des émissions comparables à celles décidées à Kyoto⁷³ « ne permet pas de parvenir à la stabilisation de la concentration de CO₂, tant s'en faut », si l'augmentation des émissions dans les pays hors Annexe I n'est pas contenue. L'étude conclut qu'une « réduction des émissions mondiales dépassant largement celles qu'envisagent les diverses propositions de limitation serait nécessaire ». Bien qu'il existe un consensus sur ce point, plusieurs profils d'évolution des émissions permettraient semble-t-il d'aboutir au résultat voulu. Wigley (1997) estime que plusieurs décennies peuvent s'écouler avant que les émissions des pays hors Annexe I ne doivent s'écarter sensiblement du profil qu'elles présentent dans le scénario de référence, y compris dans la perspective d'une stabilisation à 550 ppmv. Cet optimisme repose essentiellement sur l'hypothèse que les émissions mondiales pourront finalement être réduites à un niveau très faible (voir l'Annexe 2). Par ailleurs, ces études se fondent sur un scénario de référence central (IS92a) qui semble optimiste au vu de la forte augmentation des émissions ces derniers temps.

Il est à plus d'un titre aléatoire d'établir une relation entre les émissions passées et les concentrations futures. Premièrement, la description du cycle du carbone, dans les différents modèles scientifiques, implique des différences quant au profil temporel d'élimination du gaz de l'atmosphère. Cependant, l'analyse de sensibilité présentée dans l'Annexe 2 indique que le choix du modèle a peu de répercussions sur les résultats. Deuxièmement, pour les raisons énoncées dans le chapitre 2, les prévisions établies à partir de ces modèles deviennent moins fiables dès lors que les concentrations s'écartent sensiblement de celles qui ont été observées dans le passé.

Ces incertitudes doivent être présentes à l'esprit lorsqu'on interprétera les résultats ci-après qui visent à déduire les futurs niveaux de concentration des émissions de CO₂ telles qu'elles sont prévues par le modèle GREEN (voir l'Annexe 2)⁷⁴. Les résultats de cet exercice confirment *grosso modo* la précédente analyse du GIEC, réalisée avant la réunion de Kyoto. En ce qui concerne l'action des pays de l'Annexe I, ils peuvent être résumés comme suit :

- Telle qu'elle est définie par le Protocole de Kyoto, la limitation totale des émissions de CO₂ dans les Parties visées à l'Annexe I, à supposer qu'elle soit reconduite au-delà de la première période d'engagement, ne contribuera que dans une faible mesure à la stabilisation de la concentration de CO₂ (en tout cas sur la période 1997-2200). Tout au plus, les objectifs arrêtés à Kyoto pourraient retarder de dix ans environ le moment auquel le niveau de 550 ppmv serait atteint.
- Tout effort supplémentaire de la part des pays de l'Annexe I en vue de ramener leurs émissions à un niveau inférieur à celui qui a été défini à Kyoto n'aura que peu d'impact sur la concentration, étant donné que leur contribution aux émissions mondiales deviendrait rapidement très marginale.

Les conséquences d'un « échec de Kyoto »

On pourrait penser que ces résultats remettent en cause les mérites du Protocole de Kyoto. En effet, *a priori*, rien ne permet d'affirmer que cet accord constitue la première étape d'une démarche efficace du point de vue des coûts et susceptible d'aboutir à une stabilisation des niveaux de concentration. Pour déterminer si le profil retenu est le moins coûteux, il convient de soupeser les coûts induits par une action précoce et plus graduelle par rapport à ceux que suppose une action tardive et précipitée. Les raisons justifiant un report de l'action à une date ultérieure sont les suivantes : *i*) laisser plus de temps pour permettre le renouvellement, dans des conditions économiques normales, des capacités existantes ; *ii*) laisser plus de temps afin de développer des sources d'énergie alternatives sans carbone et bon marché ; et *iii*) tirer parti de l'effet de réduction des coûts lié à la préférence intertemporelle. S'appuyant sur les modèles d'«évaluation intégrée», certains auteurs estiment que la façon la moins coûteuse de parvenir à la stabilisation de la concentration consisterait à ne pas limiter les émissions pendant une vingtaine d'années encore, puis à imposer des réductions radicales par la suite (Wigley *et al.*, 1996). De ce point de vue, les réductions prévues par le Protocole de Kyoto ne permettraient pas de stabiliser la concentration de façon efficace du point de vue des coûts (Manne et Richels, 1998).

Cependant, retarder l'action ne va pas sans risque dans la mesure où, la connaissance scientifique du réchauffement s'améliorant, il pourrait se révéler nécessaire de procéder à des réductions plus rapides, ce qui supposerait la des-

truction prématurée des capacités en capital futures. Ainsi, en tenant compte explicitement de l'incertitude et de l'inertie qui freinent le changement des systèmes de production générant des gaz à effet de serre, Ha-Duong *et al.* (1997) parviennent à la conclusion qu'une stratégie de réductions précoces et modestes pourrait se révéler moins coûteuse dès lors qu'il existe un risque important associé au dépassement d'un certain seuil de stabilisation ou « si les valeurs du scénario de référence s'avèrent largement supérieures, dans les années à venir, à celles du scénario IS92a utilisé par le GIEC », comme le donnent à penser les prévisions établies à l'aide du modèle GREEN.

Les deux approches mentionnées ci-dessus omettent plusieurs autres facteurs. Premièrement, elles ne tiennent pas compte du fait que des réductions précoces permettraient d'accumuler de l'expérience et du savoir-faire, et donc de faire diminuer les coûts induits par les réductions ultérieures. Deuxièmement, elles ne prennent pas en considération les aspects d'équité qui sont au centre des négociations internationales et en vertu desquels les pays hors Annexe 1 ne sont pas disposés à réduire leurs émissions tant que les Parties de l'Annexe 1 n'ont pas réduit les leurs (voir ci-après). Ces arguments confortent l'opinion selon laquelle des réductions précoces mais modestes, telles que celles que prévoit le Protocole, sont les plus à même de préparer le terrain à une réaction adéquate à la menace de réchauffement du climat, compte tenu de l'incertitude et de l'inertie inhérentes au système énergétique et au processus de négociation.

4.2. Parvenir à un accord mondial

D'après l'analyse du profil temporel des émissions et des concentrations correspondantes (voir l'Annexe 2), il conviendrait pour stabiliser la concentration de CO₂ ou même retarder sensiblement le moment auquel son niveau doublera par rapport à la concentration préindustrielle d'étendre le Protocole de Kyoto aux pays hors Annexe 1 après la première période d'engagement et de les faire participer à un effort de réduction important. Cette section traite des conditions à remplir pour que les pays hors Annexe 1 participent à une stratégie globale tandis que la section suivante analyse les coûts économiques afférents.

Les pays signataires ont adhéré au Protocole de Kyoto *de leur plein gré*. On pourrait considérer qu'ils n'ont pris leurs engagements qu'après avoir pesé les avantages qu'il y aurait à bénéficier à titre gratuit des efforts entrepris par les autres pays et le risque qu'aucun accord ne soit conclu. A cet égard, on peut estimer que la logique poursuivie par les pays qui participent aux négociations sur le changement climatique est au moins en partie liée aux incitations économiques. Dans ce contexte, une littérature de plus en plus abondante fondée sur la théorie des jeux étudie la formation des coalitions avec un but environnemental, tels que le réchauffement climatique. L'encadré 6 synthétise les principales conclusions de ces travaux. En

Encadré 6. Parvenir à un accord mondial – la théorie

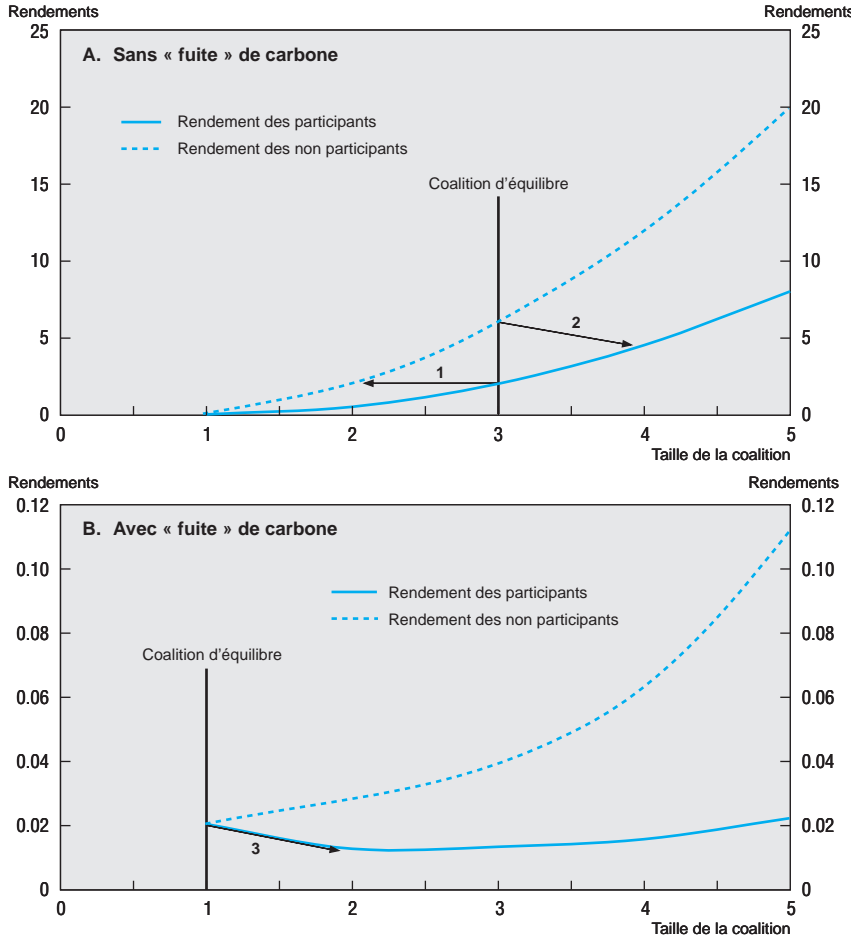
La théorie des jeux met en évidence les conditions qui doivent être remplies pour que se forme une coalition stable de pays prêts à prendre des mesures visant à atteindre un objectif environnemental de portée mondiale : premièrement, la coopération doit apporter à chaque participant un avantage supplémentaire dont il ne bénéficierait pas en son absence ; deuxièmement, il ne doit pas exister d'incitations à quitter la coalition existante ou y adhérer. Si ces critères sont respectés, la coalition est dite « spontanée » (« self-enforcing »).

On peut illustrer le problème que pose la formation d'une telle coalition en comparant les avantages nets des pays participants et non participants, dans l'hypothèse où tous les pays sont symétriques (c'est-à-dire dans l'hypothèse où les coûts marginaux de réduction, les dommages et les préférences en matière d'environnement sont identiques dans chacun d'entre eux). Les États qui ne souscrivent pas bénéficient des avantages environnementaux découlant, à l'échelle mondiale, de l'action entreprise par les membres de la coalition, alors qu'ils n'assument pas les coûts induits par cette action. Par conséquent, ces pays sont incités à bénéficier à titre gratuit des efforts entrepris par les autres pays. C'est ce qui ressort de la partie A du graphique 11, qui montre que le bénéfice des non-participants (c'est-à-dire, en l'occurrence, l'amélioration de leur bien-être) est systématiquement supérieure à celui des membres de la coalition, quelle que soit la taille de celle-ci. Ce bénéfice augmente de façon monotone à raison de la taille de la coalition, les gains en termes d'environnement s'accroissant avec le nombre de participants. Ce graphique révèle également qu'il peut exister un point d'équilibre où aucun pays n'est incité à rallier la coalition (parce que son bénéfice, en dehors de la coalition, est supérieur à celui qu'il retirerait de sa participation à une coalition élargie) ni à la quitter (parce que son bénéfice, en dehors d'une coalition plus étroite, serait moindre qu'à l'intérieur de la coalition existante¹). La taille de la coalition spontanée est subordonnée à cet équilibre et il a été démontré qu'elle est normalement réduite (Hoel, 1991 ; Barrett, 1992, 1994, 1997 et Carraro et Siniscalco, 1992). Botteon et Carraro (1998) ont montré que ce constat demeure valable lorsque l'on tient compte de certaines asymétries entre pays.

Dans le contexte du changement climatique, l'ampleur des « fuites de carbone » est un facteur important qui conditionne la taille de la coalition spontanée. Si les « fuites » sont élevées, les avantages environnementaux, à l'échelle mondiale, diminuent, de sorte que les participants doivent assumer les coûts induits par les mesures de lutte sans bénéficier des avantages correspondants, ce qui limite les incitations en faveur de la formation de la coalition (si les « fuites » sont importantes, le bénéfice de la coalition n'augmente plus nécessairement de façon monotone, comme le montre la partie B du graphique 11). Parallèlement, le bénéfice des pays qui ne coopèrent pas est plus élevé, compte tenu des avantages économiques associés aux « fuites de carbone » (baisse des prix de l'énergie, amélioration de la compétitivité des secteurs industriels gros consommateurs d'énergie). Dans ces circonstances, la taille de la coalition spontanée diminue et il peut même n'y avoir aucune incitation en faveur d'une quelconque coopération (voir, par

Encadré 6. **Parvenir à un accord mondial – la théorie (suite)**

Graphique 11. Théorie de la formation des coalitions : courbes des rendements en fonction de la taille de la coalition



1. Stabilité interne : aucun des participants n'a intérêt à quitter la coalition.
2. Stabilité externe : aucun des non-participants n'a intérêt à rallier la coalition.
3. Personne n'a intérêt à former une coalition ; la coalition d'équilibre correspondant à un seul participant.

Source : D'après Carraro et Moriconi, 1998.

Encadré 6. **Parvenir à un accord mondial – la théorie** (suite)

exemple, Carraro et Moriconi, 1998). Dans ce cas également, les conclusions peuvent demeurer valables dans l'éventualité où il existe des différences entre les pays² (Botteon et Carraro, 1998).

Les actions entreprises dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre peuvent présenter d'importants avantages accessoires à l'échelle locale. Ceux-ci réduisent l'incitation à bénéficier à titre gratuit des efforts entrepris par la coalition et de ce fait, jouent en faveur d'un élargissement de la coalition spontanée. Il est difficile de dire si les effets des « fuites de carbone » ou les avantages accessoires à l'échelle locale prévaudront.

La taille d'une coalition à vocation environnementale peut être accrue de diverses manières. Premièrement, il est possible de définir un système de transferts de façon à ce qu'aucun pays ne refuse d'y adhérer. Cependant, pour y parvenir, il faut qu'un groupe de pays s'engage à coopérer (Carraro et Siniscalco, 1993 ; Hoel, 1991 ; Carraro, 1998a). Dans cette éventualité, l'accord conclu perd son caractère spontané. Il est également possible, pour augmenter la taille d'une coalition, de « lier les problèmes » : il a par exemple été suggéré de coupler les négociations concernant l'environnement et les négociations relatives à la libéralisation des échanges (Barrett, 1995) ou la coopération dans le domaine de la R-D (Carraro et Siniscalco, 1995 ; Katsoulacos, 1997). Mais Carraro (1998a) montre que le couplage des problèmes ne permet pas nécessairement d'atteindre les objectifs environnementaux, car il incite à exclure certains pays de l'accord. De plus, cette stratégie risque de limiter les résultats obtenus dans les domaines concernés.

Enfin, la taille et la stabilité de la coalition peuvent être influencées par les règles du processus de négociation et par le comportement des participants. Ainsi, la coalition correspondant au point d'équilibre sera plus grande si les pays conjecturent correctement les conséquences de leur éventuelle défection ou de leur possible ralliement (Carraro et Moriconi, 1998). S'il existe une possibilité de négocier plusieurs accords simultanément, plusieurs coalitions se forment au point d'équilibre, ce qui implique qu'un plus grand nombre de pays luttent contre la pollution, sans pour autant que la réduction totale soit nécessairement plus élevée (Carraro, 1998a et 1998b). Des critères d'adhésion différents donnent naissance à des coalitions de tailles inégales. Ainsi, la coalition d'équilibre sera plus grande si l'adhésion est subordonnée à une règle d'unanimité (c'est-à-dire si l'entrée ou le retrait d'un pays requiert l'accord unanime de tous les membres de la coalition) (Carraro et Moriconi, 1998). Dans ce cas également, la constitution d'une grande coalition (regroupant tous les pays) nécessiterait une certaine forme d'obligation.

Si l'on part du principe que le Protocole de Kyoto correspond à la coalition spontanée de taille réduite pronostiquée par les modèles théoriques, il faut peut-être, pour l'étendre, lui ajouter de nouvelles dispositions prévoyant, par exemple, des transferts financiers et une certaine forme d'obligation. La configuration actuelle du Protocole suppose une renégociation complète de l'accord à la fin de chaque période d'engagement, y compris en ce qui concerne les nouvelles

Encadré 6. **Parvenir à un accord mondial – la théorie** (suite)

adhésions et les objectifs de réduction des émissions, ce qui pourrait se révéler insuffisamment contraignant pour élargir la coalition existante, si l'on en croit les modèles fondés sur la théorie des jeux.

1. A supposer, en outre, que sa défection soit sans influence sur les autres participants.
2. Botteon et Carraro (1998) montrent également qu'en cas d'asymétries entre les pays, les « fuites » réduisent ou accroissent la taille de la coalition selon, respectivement, qu'elle est petite ou grande à l'origine.

résumé, ces études s'accordent à considérer qu'un accord auquel les pays pourraient choisir librement d'adhérer ne rassemblerait dans le meilleur des cas qu'un petit nombre de signataires et, par conséquent, ne suffirait pas à empêcher le changement climatique. Cette conclusion pessimiste s'explique principalement par le fait que les pays pris individuellement ont une forte incitation économique à bénéficier à titre gratuit des efforts faits par les autres pays. La littérature estime également que si les « fuites de carbone » sont importantes, il est encore plus difficile de rallier un grand nombre de pays à un accord dans la mesure où cette incitation à ne pas participer est encore plus forte. Inversement, l'existence d'avantages secondaires à l'échelle locale est susceptible de stimuler la participation des États à un accord. Par ailleurs, certaines études mettent en évidence quelques moyens qui permettraient d'étendre cette coalition stable de taille réduite, par exemple l'octroi de transferts aux pays hésitants.

On peut se demander si de simples modèles théoriques mettant l'accent sur les incitations économiques permettent réellement de faire des prévisions quant aux négociations en cours sur le changement climatique⁷⁵. De manière générale, les modèles ne tiennent pas compte de façon satisfaisante des asymétries entre les pays qui participent à ces négociations. Quelques études ont essayé de valider les résultats des modèles théoriques dans le cas où les participants ne sont pas identiques (Botteon et Carraro, 1998, par exemple). Elles semblent confirmer les conclusions tirées du modèle simple, où les pays présentent des caractéristiques identiques, mais la démarche reste pour l'instant difficile à généraliser et ne permet pas véritablement d'émettre des recommandations sur les actions à entreprendre. Les asymétries concernent notamment les répercussions des changements climatiques, susceptibles d'être très différentes d'un pays à l'autre (voir le chapitre 5). Parallèlement, la perception du réchauffement et des actions adoptées pour l'enrayer peuvent varier elles aussi, selon les préférences nationales. Ainsi, la protection de l'environnement est souvent présentée comme un bien supérieur (dont l'utilité aug-

mente en fonction du niveau de revenu). Si l'on s'en tient à cette analyse, on peut considérer que les pays qui ont pris des engagements aux termes du Protocole de Kyoto ont une nette préférence pour un environnement propre alors qu'ils pâtissent relativement peu des conséquences du changement climatique (ou, dans certains cas, en retirent des avantages). À l'inverse, les pays en développement seraient plus affectés par des modifications du climat, mais se montreraient plus indifférents à ce problème. De ce point de vue, l'état actuel des négociations refléterait l'ampleur des dommages qu'auront à subir les pays industriels et qui, d'après les prévisions, devrait être relativement modeste, ainsi que le peu d'importance accordée à la stabilité du climat par les pays en développement. Il serait donc logique que l'accord en vigueur soit progressivement étendu à mesure que grandirait, parallèlement à la hausse du revenu réel, l'importance attachée aux problèmes d'environnement dans les pays en développement. Toutefois, ce processus risque d'être long et de laisser le temps aux concentrations d'atteindre un niveau très élevé. Bien entendu, ces considérations ne tiennent pas compte de l'incertitude ni du profil des risques, y compris l'existence, certes peu probable, de scénarios catastrophiques.

Plus fondamentalement, on peut se demander jusqu'à quel point il est justifié d'invoquer un raisonnement économique pour décrire la formation des coalitions et l'évolution à venir du processus de négociation. Dans la mesure où ce sont les émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre qui ont par le passé contribué à l'élévation des niveaux de concentration dans l'atmosphère, la responsabilité en incombe en grande partie aux pays de l'Annexe 1, dont les émissions représentaient encore les deux tiers du total en 1995. Dans ces circonstances, la plupart des pays en développement en appellent au respect d'une élémentaire équité et refusent de se soumettre à une limitation de leurs propres émissions, qui sont généralement très inférieures, par habitant, à celles des pays Membres de l'OCDE, d'autant que ces derniers sont beaucoup plus riches qu'eux. En effet, à peu près toutes les stratégies de réduction des émissions mondiales supposent une redistribution des revenus à l'échelle internationale. En présence de droits d'émission négociables, cet effet est immédiatement perceptible : les États qui reçoivent un quota d'émissions important bénéficient de transferts de la part de ceux qui se voient allouer peu ou pas de droits. Il est utile de replacer ce problème de distribution des permis dans le contexte des droits de propriété, où il peut être étudié sous trois angles différents.

Une première approche consiste à considérer les droits de propriété tels qu'ils sont implicitement définis dans la CCNUCC. La Convention-cadre spécifie, entre autres, que le changement climatique concerne l'humanité tout entière, que les efforts visant à résoudre le problème doivent se fonder sur le principe de l'équité et que ses Parties sont déterminées à préserver le climat pour les générations présentes aussi bien que futures. On peut en conclure que si le climat est l'affaire de tous, il est aussi un bien d'intérêt général, et que, en vertu de l'équité, chaque indi-

vidu en détient une part égale à celle des autres. De là à dire que pour être neutre, le système d'attribution doit reconnaître à tous les individus le même droit à obtenir des permis d'émission de gaz à effet de serre (le même droit à détériorer le climat), il n'y a qu'un pas.

On peut également envisager la question sous l'angle des conséquences d'un changement de régime. Pour l'instant, du point de vue juridique, les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas considérées comme répréhensibles⁷⁶ et les agents économiques ne sont pas censés se comporter comme si elles l'étaient. Toute réforme juridique introduisant une discrimination sur la base des émissions passées pourrait être jugée inéquitable au sens où elle instituerait une sanction rétroactive. De là à dire que le respect de l'équité passe par celui des droits acquis, il n'y a qu'un pas également.

En troisième lieu, l'équité peut être considérée dans une perspective économique (et dissociée des émissions physiques). Cette optique met l'accent sur la distribution du revenu et revient à dire que c'est aux pays les plus riches qu'il incombe de consentir la plus grande part de l'effort. Dans ce cas, on peut conclure que l'attribution des droits d'émission doit refléter les revenus relatifs.

Rien ne permet de trancher nettement en faveur de l'une ou l'autre de ces trois interprétations. D'un point de vue pratique, il faut trouver un moyen d'attribuer les quotas d'émissions de manière à encourager les gros émetteurs présents et futurs à participer. Il serait peut-être envisageable, par exemple, de prévoir une période transitoire pour passer d'une attribution fondée sur les droits acquis à une répartition égale par habitant⁷⁷. Un consensus sur un tel système d'attribution inciterait peut-être les pays hors Annexe 1 à limiter volontairement leurs droits d'émission négociables pour la première période d'engagement, sans affaiblir la limitation générale des émissions imposée par le Protocole de Kyoto (ce qui empêcherait la production d'«air chaud»). Cela éviterait de pénaliser les Parties de l'Annexe 1 si lourdement qu'elles risquent de rejeter le dispositif dans son ensemble. En revanche, cela ne serait peut-être pas suffisant pour convaincre les pays hors Annexe 1 de participer.

Cette analyse ne permet de tirer aucune conclusion définitive quant à la façon d'amener les pays hors Annexe 1 à accepter de limiter leurs émissions dans un avenir proche. Seules quelques généralités se dégagent : s'en remettre à l'intérêt bien compris tel que le perçoivent les pays individuellement n'est pas suffisant ; il convient de respecter au moins en partie le principe de l'équité ; des transferts financiers seront probablement nécessaires pour favoriser un consensus sur la notion d'équité, qui n'a pas les mêmes implications selon l'idée que l'on s'en fait. La section suivante aborde certaines de ces questions et vise à fournir une évaluation quantitative de leur importance.

4.3. Coûts économiques de la stabilisation de la concentration de CO₂

Cette section fournit quelques chiffres afin d'illustrer les coûts pour les pays de l'Annexe 1 d'accords mondiaux visant à stabiliser les concentrations, compte tenu des compensations financières éventuelles destinées à inciter les pays hors Annexe 1 à participer.

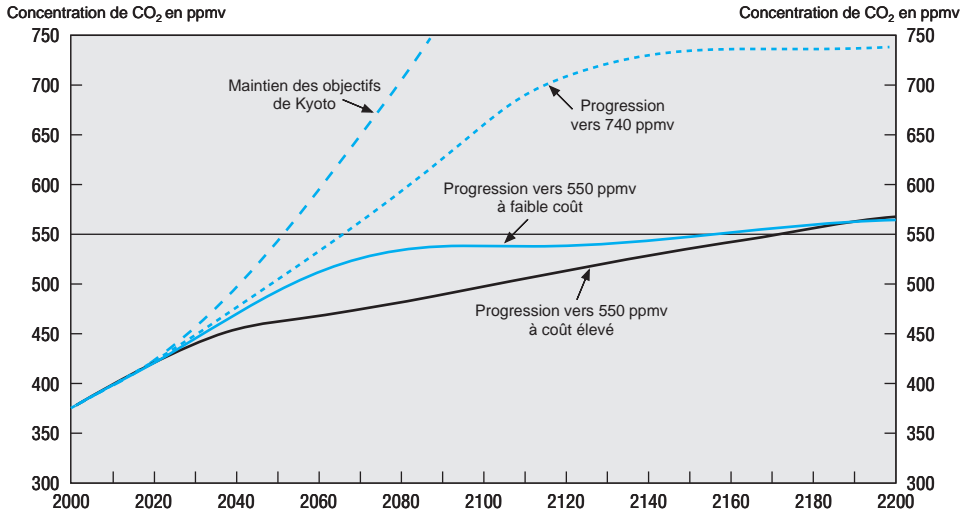
Plusieurs profils d'évolution des émissions peuvent conduire à la stabilisation des concentrations d'ici la fin du XXII^e siècle. Cependant, l'accent est mis ici sur un horizon moins éloigné (de la première période d'engagement, à savoir 2008-2012, à 2050). En conséquence, les scénarios analysés ci-après sont davantage axés sur le degré d'aversion pour le risque que sur la stabilisation *stricto sensu*. De même, les importantes incertitudes inhérentes à la « traduction » des profils d'évolution des émissions en niveaux de concentration incitent elles aussi à mettre l'accent sur l'aversion pour le risque plutôt que sur les niveaux de concentration à prendre pour cible. L'analyse porte sur trois scénarios mondiaux de stabilisation des émissions, qui supposent des réductions à des degrés divers mais qui ont en commun d'exiger la participation des pays hors Annexe 1 pour parvenir aux objectifs définis :

- Le premier scénario est fondé sur l'hypothèse d'une faible aversion pour le risque : les réductions d'émissions sont mises en œuvre de façon à ce que la concentration de CO₂ augmente jusqu'à 550 ppmv en 2080 (scénario de la « stabilisation à 550 ppmv à faible coût » dans le graphique 12), puis se stabilise à peu près à ce niveau.
- Le deuxième scénario envisage une aversion pour le risque élevée, d'où des engagements de réduction des émissions plus rigoureux en vue de maintenir la concentration à un niveau inférieur à 550 ppmv au cours du siècle prochain (scénario de la « stabilisation à 550 ppmv avec un coût élevé » dans le graphique 12).
- Dans le troisième scénario, la concentration augmente jusqu'à 740 ppmv et ne se stabilise qu'au milieu du XXII^e siècle (scénario de la « stabilisation à 740 ppmv » dans le graphique 12).

Le partage de la charge

Il existe aussi plusieurs façons de partager la charge que représentent ces réductions entre les Parties visées à l'Annexe 1 et les autres pays signataires. En principe, le Protocole de Kyoto suppose un accord sur le partage de la charge. A cette fin, il pourrait être envisagé, par exemple, d'étendre la règle d'équité sous-jacente à la version actuelle du Protocole aux pays hors Annexe 1. En pratique, toutefois, il est difficile de dire à quelle règle obéit le partage de la charge dans la version actuelle du Protocole (encadré 7). Notamment, on peut se demander si

**Graphique 12. Le long terme :
différents profils d'évolution des concentrations de CO₂**



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

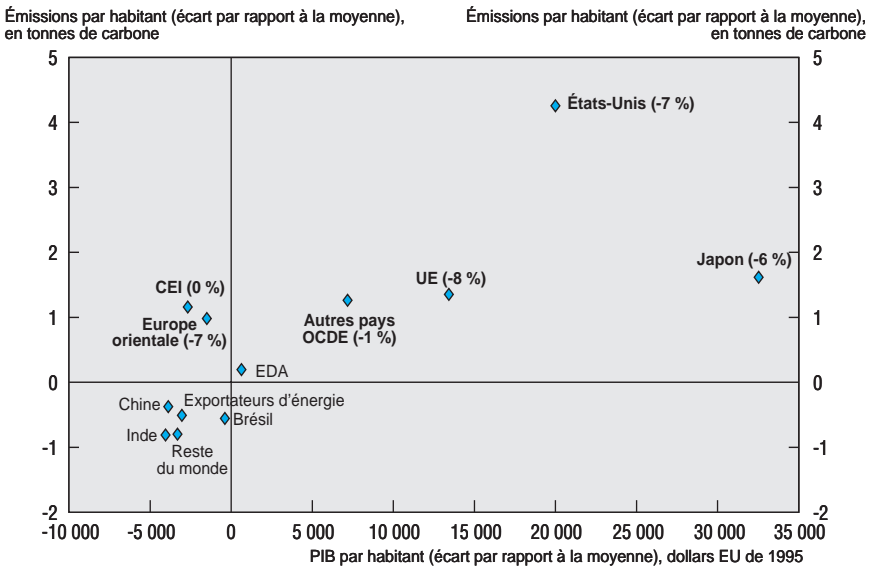
l'ampleur des engagements pris par les Parties répond à quelque critère fondé sur les émissions par habitant ou sur le revenu par habitant, ou bien si elle est uniquement le fruit des négociations. Par ailleurs, le Protocole ne comporte aucune indication quant aux principes qui doivent régir la détermination des objectifs au-delà de 2012. Compte tenu de ces incertitudes, l'analyse qui suit des élargissements possibles du Protocole est basée sur des archétypes de règles de répartition des charges qui ne sont donnés qu'à titre indicatif et ne sauraient être interprétés comme des propositions concrètes.

L'une des règles d'équité envisageables est fondée sur le principe de la « capacité à payer », en vertu duquel les pays hors Annexe 1 prendraient des engagements à partir du moment où leur revenu réel par habitant dépasse un certain seuil. De plus, ces engagements seraient proportionnels aux niveaux relatifs de revenu par habitant (voir Annexe 3). On peut aussi prendre les émissions de CO₂ par habitant comme critère de partage de la charge des réductions futures. Dans ce système, que nous appellerons « règle de l'égalité des émissions par habitant », les pays hors Annexe 1 rallieraient la coalition en vue de réduire les émissions, dès que leurs émissions par habitant atteignent le même niveau que dans les Parties de l'Annexe 1 (voir Annexe 3). Dans ce cas de figure, tous les pays du monde

Encadré 7. Y-a-t-il une règle d'équité derrière le Protocole de Kyoto ?

Le contenu du Protocole de Kyoto résulte essentiellement de négociations politiques. Toutefois, la liste des signataires aussi bien que la répartition des réductions d'émissions entre Parties sont révélatrices des choix sous-jacents en matière de partage de la charge. A l'évidence, la distinction opérée entre les pays de l'Annexe 1 et le reste du monde reflète le sentiment selon lequel les pays les plus riches doivent jouer un rôle moteur dans la lutte contre le changement climatique. Comme en témoigne le graphique 13, la plupart des pays de l'Annexe 1 font partie des pays du monde qui affichent les niveaux d'émissions et les PIB par habitant les plus élevés. Cela étant, la participation de la CEI et des pays d'Europe orientale semble indiquer que la règle à laquelle obéit le Protocole en matière de partage de la charge s'appuie sur les émissions – et non pas sur le PIB – par habitant.

Graphique 13. Émissions et PIB par habitant en 1995



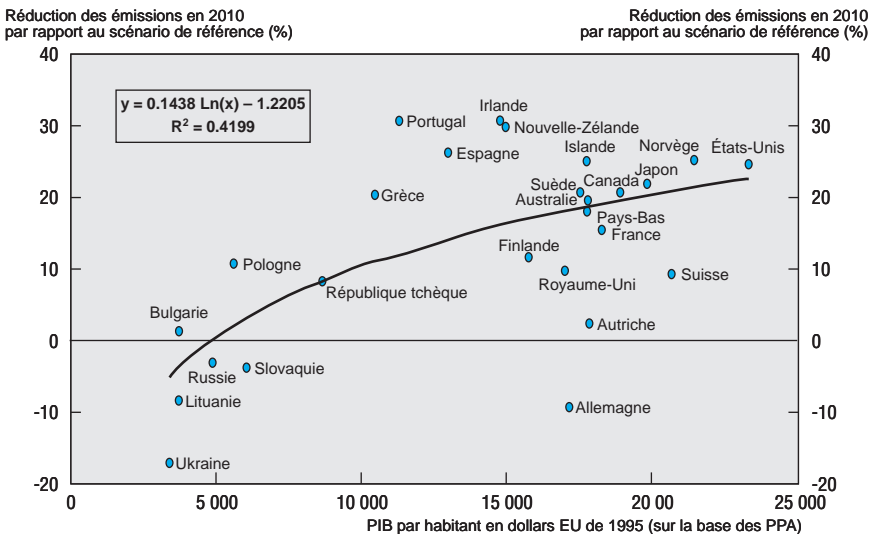
Note : Les pourcentages entre parenthèses correspondent aux réductions des émissions spécifiées dans le Protocole de Kyoto (par rapport au scénario de référence).

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Encadré 7. Y-a-t-il une règle d'équité derrière le Protocole de Kyoto ? (suite)

On peut également se demander si la distribution des objectifs d'émissions arrêtée à Kyoto est subordonnée de manière systématique aux émissions ou au PIB par habitant dans chacun des pays participants. La formulation des objectifs (exprimés par rapport aux niveaux des émissions en 1990) ne met en évidence aucun lien systématique. En revanche, lorsque les réductions sont calculées par rapport aux niveaux des émissions en 2010 tels qu'ils sont anticipés par le GIEC, une corrélation peut être dégagée, même si elle est loin d'être très significative (graphique 14). Cette corrélation indique que les pays de l'Annexe 1 dont le PIB par habitant est plus élevé ont en général accepté de réduire davantage leurs émissions en 2010 par rapport aux niveaux de référence*. Comme en témoigne l'estimation logarithmique dont fait état le graphique 14, un doublement du PIB par habitant correspondrait à une augmentation de 14 pour cent de la propension à réduire les émissions en 2010. Certains pays (par exemple les États-Unis, le Canada, le Japon et quelques États d'Europe du Sud) se sont engagés à réduire leurs émissions au-delà de cette règle implicite fondée sur la « capacité à payer », alors que d'autres pays d'Europe

Graphique 14. Réductions des émissions en 2010 en fonction du PIB par habitant pour les pays de l'Annexe 1



Source : AIE et GIEC.

Encadré 7. **Y-a-t-il une règle d'équité derrière le Protocole de Kyoto ? (suite)**

occidentale, la CEI et certains pays d'Europe orientale se sont montrés relativement moins ambitieux. A supposer qu'il soit possible de dégager une règle systématique sous-jacente au Protocole de Kyoto, il semble donc que les engagements aient été définis en termes de réduction par rapport au niveau projeté en 2010. Autrement dit, les négociateurs auraient pris en considération l'augmentation des émissions jusqu'à la première période d'engagement en l'absence de mesures de réduction, telle que prévue dans le scénario de référence, et non pas les objectifs en soi exprimés par rapport au niveau des émissions en 1990.

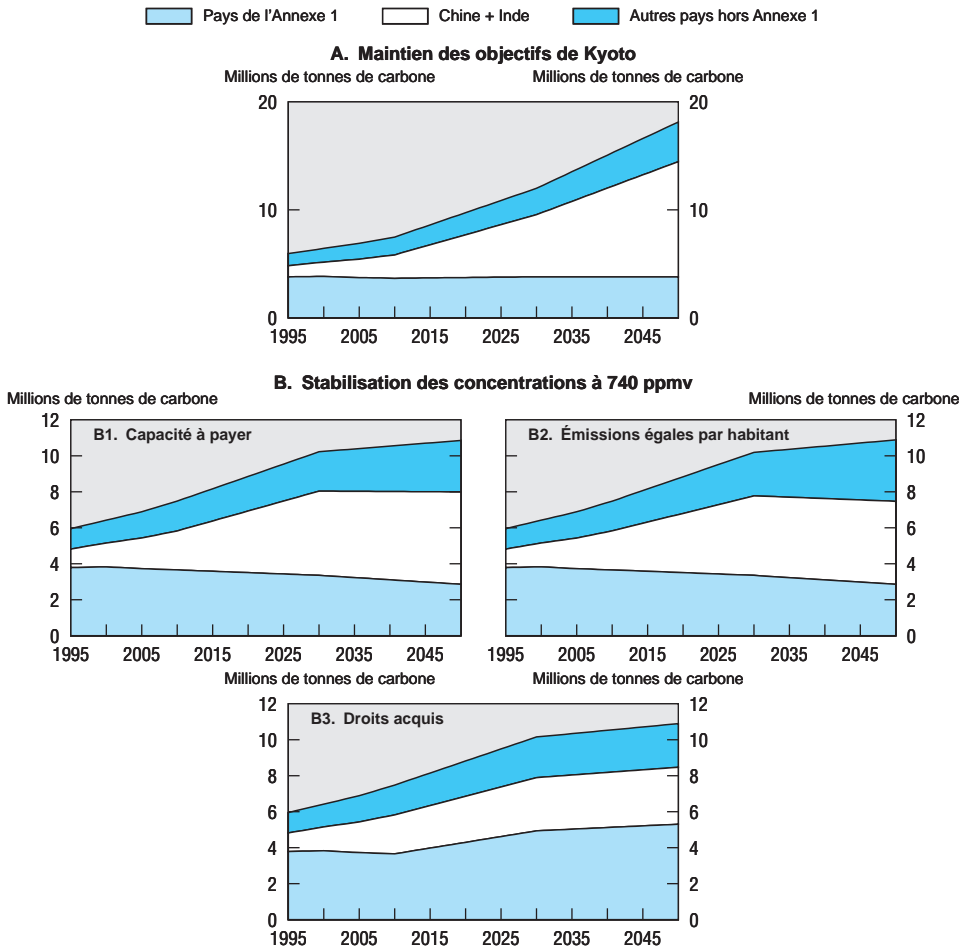
- * Il n'existe apparemment aucune corrélation positive entre les réductions des émissions et leur niveau par habitant dans chacune des Parties de l'Annexe 1. En ce qui concerne les États membres de l'Union européenne, les réductions s'appuient sur les projections du GIEC et sur le taux de réduction global de l'Union européenne par rapport au niveau atteint en 1990, tel que spécifié dans le Protocole de Kyoto (-8 pour cent).

finiraient par converger vers le même niveau d'émissions par habitant. Comme le montre le graphique 15, ces deux règles (« capacité à payer » et « égalité des émissions par habitant ») impliquent une augmentation de la part des pays hors Annexe 1 dans les émissions mondiales à long terme.

Une autre règle de partage de la charge, très différente, consiste à répartir les droits d'émission futurs sur la base de « droits acquis » déterminés par les émissions actuelles. Autrement dit, tous les pays du monde réduiraient leurs émissions dans les mêmes proportions, ce qui signifie que la part de chacun d'eux dans les émissions mondiales resterait constante (voir Annexe 3). Pour qu'une coalition mondiale se constitue conformément à cette règle, il faudrait que les pays hors Annexe 1 acceptent de maintenir leurs émissions par habitant à un niveau très inférieur à celui des pays de l'Annexe 1. Les trois règles de partage de la charge sont simulées pour chacun des trois scénarios mondiaux de stabilisation des émissions (stabilisation à 550 ppmv à faible coût, à 550 ppmv avec un coût élevé, et à 740 ppmv).

Ces scénarios induisent deux types de flux financiers entre pays. Premièrement, chacun des scénarios décrits ci-dessus est simulé avec l'hypothèse que, soit tous les pays s'échangent des permis, soit qu'il n'y a pas d'échange du tout⁷⁸. Dans le premier cas, les flux financiers correspondent à la contrepartie des échanges de permis. De plus, des transferts compensatoires sont utilisés pour stimuler la participation des pays hors Annexe 1 qui, sans eux, seraient incités à tirer parti à titre

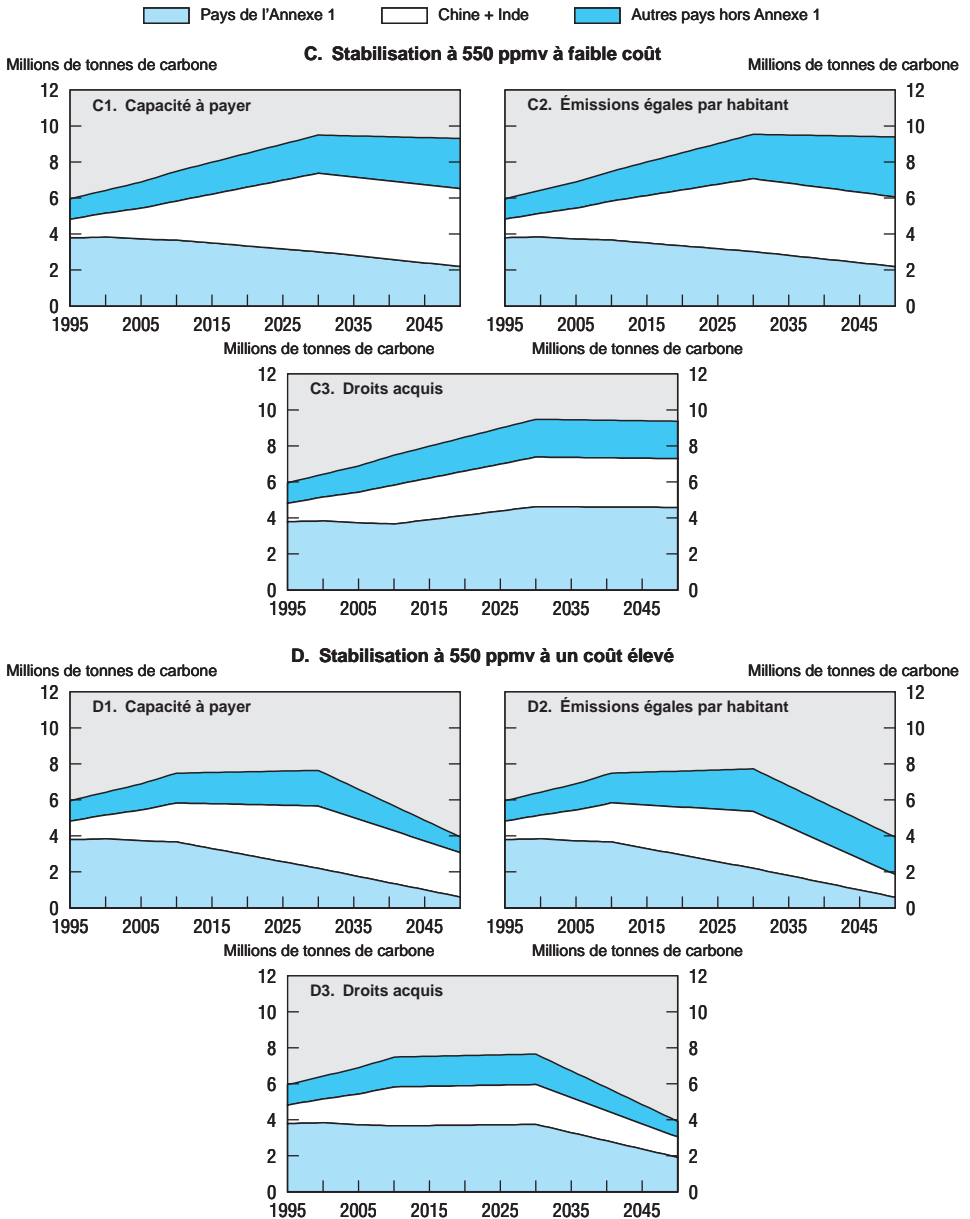
Graphique 15. **Partage de la charge selon différents scénarios, 2010-2050**
Niveaux d'émission annuels



Source: Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

gratuit des efforts entrepris par les pays participants. Dans les trois scénarios, les simulations se fondent sur l'hypothèse selon laquelle les pays hors Annexe 1 qui enregistrent des pertes en participant à l'action commune, compte tenu du produit des ventes de permis, recevraient une compensation financière sous forme de transferts payés par les pays de l'Annexe 1⁷⁹.

Graphique 15. Partage de la charge selon différents scénarios, 2010-2050 (suite)
Niveaux d'émission annuels



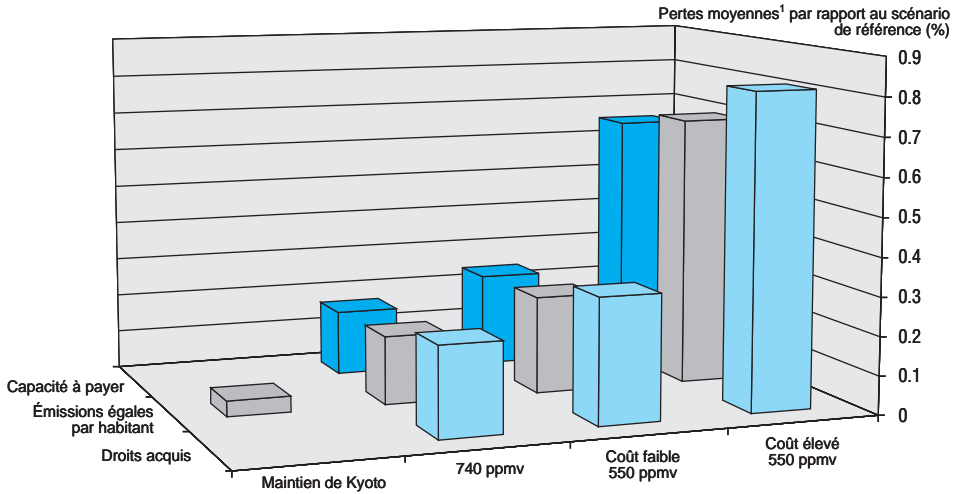
Coûts économiques

Le graphique 16 présente une comparaison des coûts annuels moyens actualisés⁸⁰ au niveau mondial sur la période 2010-2050, et ce pour tous les scénarios qui simulent un système général d'échanges englobant tous les pays, y compris celui qui prévoit le maintien des objectifs de Kyoto, évoqué dans la section 4.1. Aucune formule n'est aussi peu coûteuse que le maintien du Protocole, tant s'en faut, ce qui n'est pas surprenant étant donné que cette solution est loin de mener à une quelconque stabilisation des concentrations. Les stratégies plus ambitieuses (par exemple, le scénario de stabilisation à 550 ppmv avec un coût élevé) entraînerait une perte économique de 0.6 à 0.8 pour cent en termes de revenu réel. En supposant un marché libre des permis entre tous les pays, le coût total à l'échelle mondiale n'est pas influencé, en principe, par le choix de la règle de partage de la charge⁸¹. En revanche, il est fortement déterminé par l'ampleur de l'effort de réduction global.

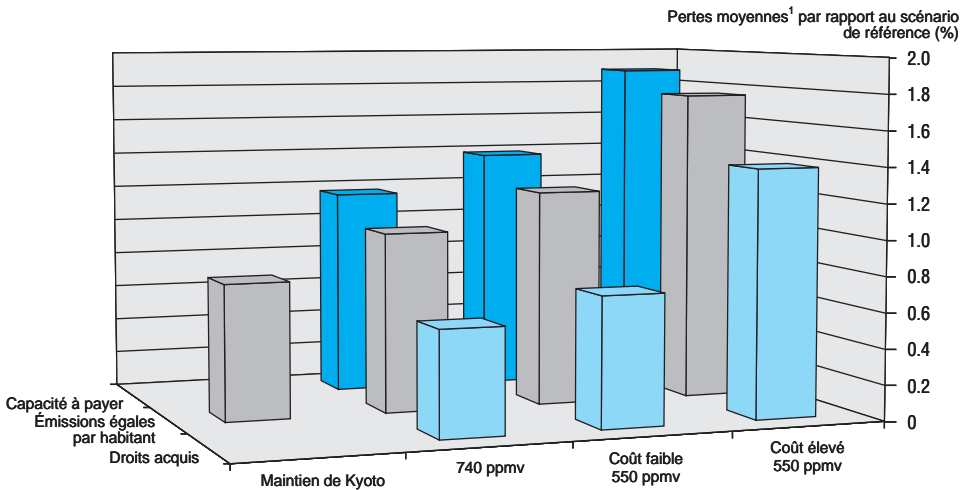
En l'absence d'échanges de permis, le résultat est différent (graphique 17). Dans ce cas, les coûts mondiaux totaux varient en fonction de la règle de partage de la charge retenue. La plus onéreuse, quel que soit le niveau de stabilisation fixé, est la règle qui se fonde sur la « capacité à payer » et la moins coûteuse est celle des « droits acquis ». La règle de « l'égalité des émissions par habitant » se classe entre les deux. Ces différences tiennent au fait que chacune de ces règles suppose une répartition différente des réductions d'émissions entre les pays où les coûts sont faibles et ceux où ils sont élevés. La règle fondée sur la « capacité à payer » est la plus onéreuse parce qu'elle entraîne moins de réductions dans les pays à faibles coûts, tels que la Chine et l'Inde (graphique 15). En revanche, la règle des « droits acquis » aboutit à un coût global nettement inférieur car elle reporte les réductions sur ces mêmes pays à coûts faibles (graphique 15). La règle de « l'égalité des émissions par habitant » est plus onéreuse que la précédente parce qu'elle impose une contribution plus élevée aux pays industriels et semi-industrialisés, mais elle a un coût moins élevé que la règle fondée sur la « capacité de payer » parce qu'elle prévoit des réductions plus importantes dans les pays à faibles coûts (graphique 15).

Dans tous les scénarios, le commerce de permis réduit considérablement les coûts. Toutefois, le gain est plus important si l'on partage la charge sur la base de la « capacité à payer » ou de « l'égalité des émissions pas habitant » qu'en fonction des « droits acquis » (comme en témoigne la comparaison entre les graphiques 16 et 17). Cela tient au fait que, dans les deux premiers cas, les pays à faibles coûts reçoivent davantage de droits d'émission et qu'il leur est possible, grâce aux échanges, de tirer un meilleur parti des possibilités de réduction qui s'offrent chez eux.

Graphique 16. Pertes moyennes de revenu réel annuel et mondial dans différents scénarios
Avec échange de permis, 2010-2050



Graphique 17. Pertes moyennes de revenu réel annuel et mondial dans différents scénarios
En l'absence d'échange de permis, 2010-2050



1. En variation équivalente du revenu réel des ménages, compte tenu d'un taux d'actualisation de 3 %.
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

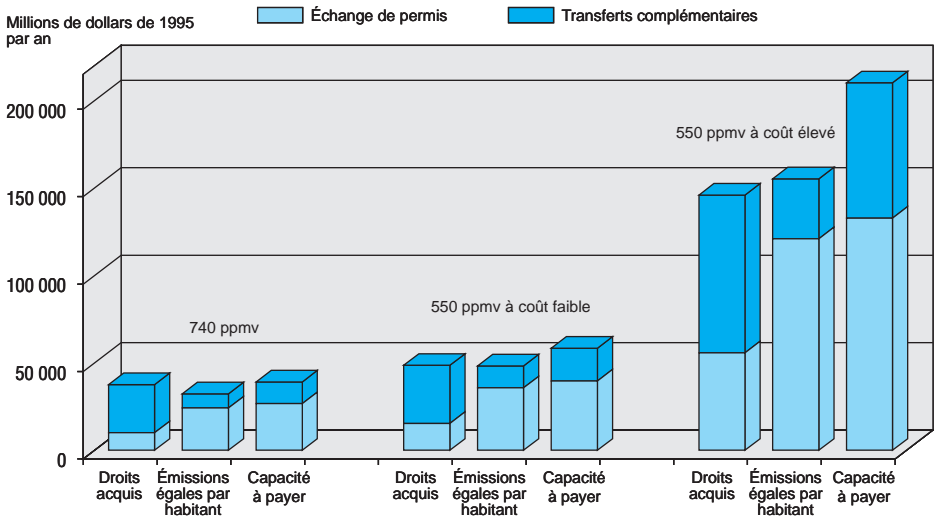
Ces constatations ont plusieurs implications. Premièrement, elles mettent en évidence l'influence à long terme que le commerce des permis exerce sur les coûts économiques et donc, implicitement, sur l'efficacité du point de vue environnemental. Pour des coûts donnés, les échanges permettent d'atteindre des objectifs beaucoup plus ambitieux. Ainsi, la trajectoire de stabilisation à 550 ppmv impliquant un moindre risque se révèle moins onéreuse, dans ces conditions, que le scénario qui prévoit le maintien du Protocole en l'absence de commerce de permis, alors que cette dernière formule n'a pratiquement aucun impact sur la concentration. En outre, les résultats indiquent que les modalités de répartition des futures réductions d'émissions ou des droits a un effet sur les coûts totaux, sauf si le marché des permis fonctionne d'une manière parfaite (c'est-à-dire conduisant à une péréquation complète des coûts marginaux de réduction entre pays). Dans ce sens, les négociations en cours, dont il ressort que les pays en développement ne sont pas disposés à limiter leurs émissions tant que les pays industriels n'ont pas substantiellement réduit les leurs (ce qui implique de recourir à une règle du type de celles fondées sur la « capacité à payer » ou « l'égalité des émissions par habitant »), ont peu de chances de déboucher sur une formule efficace du point de vue des coûts, à moins qu'elle n'autorise les échanges de droits d'émission à grande échelle, lesquels permettraient d'obtenir des réductions dans les pays hors Annexe I, où elles ont un coût inférieur.

Le commerce de permis à l'échelle mondiale engendrerait probablement des flux monétaires importants entre les pays. Le graphique 18 indique que leur valeur totale (règlements des permis et transferts compensatoires) dépend en premier lieu de l'ampleur de l'effort de réduction. Dans le cas de réductions modestes, ces flux monétaires représenteraient environ 50 milliards de dollars de 1995 par an en moyenne⁸². En revanche, si l'objectif de réduction de la concentration était plus ambitieux (comme dans le scénario de stabilisation à 550 ppmv avec un coût élevé), ils seraient beaucoup plus importants et atteindraient 150 à 200 milliards de dollars de 1995 par an. Pour mettre ces chiffres en perspective, rappelons que les flux nets totaux engendrés par l'aide publique au développement se sont montés à 48 milliards de dollars en 1997. Le graphique 18 met également en lumière l'arbitrage entre commerce de permis et paiements de transfert : la règle fondée sur la « capacité à payer » ou celle de « l'égalité des émissions par habitant » aboutit à une plus grande redistribution à l'échelle internationale par les flux monétaires associés à la vente des permis, tandis que la règle des « droits acquis » repose davantage sur les transferts compensatoires pour inciter les pays à former une coalition mondiale.

Le tableau 10 montre les résultats concernant les Parties de l'Annexe I. Dans la plupart des cas, la stabilisation des concentrations induit un coût relativement élevé dès lors que les pays concernés ne sont pas autorisés à échanger (en l'occurrence à acheter) des droits d'émission. L'estimation la plus basse correspond à la

Graphique 18. Flux monétaires annuels moyens¹ en fonction des différentes règles de partage des charges

Moyenne sur la période 2010-2050



1. Flux actualisé moyen compte tenu d'un taux d'actualisation de 3 %.

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Tableau 10. Coûts de différentes règles de partage de la charge pour les pays de l'Annexe I

Écart moyen en pourcentage¹ par rapport au scénario de référence pour la période 2010-2050

	740 ppmv	550 ppmv à faible coût	550 ppmv à coût élevé
Droits acquis			
Sans échange	-0.56	-0.70	-1.04
Échanges mondiaux	-0.21	-0.31	-0.76
Échanges mondiaux + transferts	-0.46	-0.60	-1.42
Émissions égales par habitant			
Sans échange	-1.15	-1.22	-1.46
Échanges mondiaux	-0.35	-0.51	-1.34
Échanges mondiaux + transferts	-0.46	-0.65	-1.63
Capacité à payer			
Sans échange	-1.17	-1.25	-1.46
Échanges mondiaux	-0.35	-0.51	-1.36
Échanges mondiaux + transferts	-0.48	-0.69	-1.91

1. En équivalent de variation du revenu réel des ménages compte tenu d'un taux d'actualisation de 3 %.

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

règle des « droits acquis » : elle s'échelonne entre 0.6 et 1 pour cent du revenu réel par an, suivant l'ampleur des réductions. Dans le scénario de stabilisation à 550 ppmv avec un coût élevé, les pertes de revenu réel atteignent en revanche 1 à 1.5 pour cent par an. De plus, dans ce cas, le commerce de permis a un impact moindre en terme de réduction des coûts : premièrement, parce que les coûts marginaux, compte tenu de l'ampleur des réductions, tendent à converger dans les différents pays vers les niveaux de prix déterminés par les sources d'énergie alternatives disponibles, d'où une diminution des gains d'efficience potentiels liés au commerce de permis ; deuxièmement, en raison de la forme des courbes de coûts lorsque les sources d'énergie alternatives sont disponibles⁸³.

Le tableau 10 rend également compte des coûts moyens supportés par les pays de l'Annexe 1 dans le cas où ils procèdent à des paiements de transferts destinés à dédommager les pays hors Annexe 1 de toute perte de revenu réel induite par leur participation à la réduction des émissions⁸⁴. Dans le scénario où la concentration est maintenue à un niveau sensiblement inférieur à 550 ppmv pendant le siècle à venir (scénario de la « stabilisation à 550 ppmv avec un coût élevé »), les pays de l'Annexe 1 subiraient en moyenne des pertes annuelles comprises entre 1.4 et 2 pour cent de leur revenu réel⁸⁵. Ces pertes sont loin d'être négligeables, dans la mesure où il s'agit en l'occurrence d'une estimation moyenne calculée sur une longue période (40 ans), avec un taux d'actualisation de 3 pour cent. De toute évidence, de telles pertes remettent en cause la faisabilité et la pertinence de la stratégie en question. Dans ce cas également, la nature de la règle de partage de la charge joue un rôle important, puisque celles qui s'appuient sur la « capacité à payer » ou « l'égalité des émissions par habitant » induisent des coûts sensiblement plus élevés que la règle des « droits acquis ».

En ce qui concerne les pays hors Annexe 1, les effets sur le revenu réel varient d'une perte de 3 pour cent dans le scénario de la « stabilisation à 550 ppmv avec un coût élevé », en l'absence de commerce de permis, à des gains à des degrés divers dans les scénarios prévoyant des compensations financières (tableau 11)⁸⁶. En général, ces pays retireraient davantage de bénéfices du commerce de permis que les pays de l'Annexe 1 (notamment dans le scénario le plus contraignant, c'est-à-dire celui qui prévoit la « stabilisation à 550 ppmv avec un coût élevé »). De plus, paradoxalement, le partage de la charge sur la base de la « capacité de payer » et de « l'égalité des émissions par habitant » induit des coûts plus élevés, pour les pays hors Annexe 1, que la règle des « droits acquis » en l'absence de commerce de permis⁸⁷. Pour tous les pays, l'influence de la règle de partage de la charge sur les résultats est moindre que celle imputable au degré d'ambition en matière de limitation de la concentration (qui reflète le degré d'aversion pour le risque). En particulier, le scénario prévoyant une aversion pour le risque élevée suppose des coûts très importants, à telle enseigne que l'on serait fondé à se demander si les

Tableau 11. **Coûts de différentes règles de partage de la charge pour les pays hors Annexe I**

Écart moyen en pourcentage¹ par rapport au scénario de référence pour la période 2010-2050

	740 ppmv	550 ppmv à faible coût	550 ppmv à coût élevé
Droits acquis			
Sans échange	-0.65	-0.78	-2.13
Échanges mondiaux	-0.28	-0.35	-0.92
Échanges mondiaux + transferts	0.26	0.27	0.48
Émissions égales par habitant			
Sans échange	-0.72	-1.20	-2.39
Échanges mondiaux	0.18	0.29	0.67
Échanges mondiaux + transferts	0.42	0.59	1.28
Capacité à payer			
Sans échange	-1.16	-1.65	-2.78
Échanges mondiaux	0.21	0.33	0.84
Échanges mondiaux + transferts	0.50	0.70	2.01

1. En équivalent de variation du revenu réel des ménages compte tenu d'un taux d'actualisation de 3 %.

Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

avantages d'un tel effort sont effectivement supérieurs aux coûts. Le chapitre suivant aborde la question des coûts associés à une politique d'adaptation au changement climatique.

5. L'adaptation au changement climatique

Selon des prévisions qui font l'unanimité, un certain changement du climat est inéluctable et se poursuivra sans doute sur une longue période, peut-être pendant plusieurs siècles. Malgré leur grande complexité, les modèles de prévision du climat ne donnent que des indications approximatives sur la façon dont il peut évoluer dans des régions données. Pour l'heure, il est donc techniquement impossible d'effectuer des simulations qui fassent correspondre un profil d'évolution hypothétique particulier des émissions de gaz à effet de serre au changement de climat qui en résulterait au fil du temps, même pour de grandes régions de la planète, et à plus forte raison pour les différents pays de l'OCDE.

Il est presque impossible, à l'échelon national, d'évaluer comment le climat évoluera et de dresser dès à présent des plans en conséquence, même s'il s'est dégagé, d'une façon ou d'une autre, un accord sur le profil d'évolution future des émissions qui emporte l'adhésion au niveau mondial. Il y a une convergence de vues – comme le montre un rapport récent du GIEC (1998) – sur la nature probable du changement climatique et sur ses incidences environnementales dans diverses régions du monde au cours des 50 à 100 prochaines années (c'est-à-dire à court ou à moyen terme), compte tenu d'un ensemble déterminé d'hypothèses sur les

effets des émissions. Le présent chapitre récapitule les principaux aspects de ce consensus. Pour un petit nombre de pays, des rapports nationaux fournissent des estimations plus détaillées. Sont ensuite examinés les secteurs de l'économie qui semblent les plus vulnérables aux incidences du changement climatique, puis les coûts et avantages possibles de ces évolutions, et les possibilités d'adaptation aux nouvelles situations, ainsi que l'influence de l'incertitude sur l'idée que l'on se fait de ces questions.

5.1. *Changement climatique prévu*

Les paragraphes qui suivent ont été élaborés à partir du rapport spécial du GIEC de 1997 sur les impacts régionaux du changement climatique (GIEC, 1998). Cet ouvrage distingue 10 régions ; cinq d'entre elles ne comprennent aucun pays de l'OCDE⁸⁸ et elles ont moins retenu l'attention⁸⁹. Les rapports régionaux n'utilisent pas tous les mêmes hypothèses sur le réchauffement de la planète ou l'élévation du niveau de la mer, mais celles-ci ont été uniformisées sur un doublement de la concentration de CO₂ vers la seconde moitié du siècle prochain, un accroissement global des températures de 2.5 °C (fourchette comprise entre 1.5 °C et 4 °C) et une hausse du niveau de la mer de 0.5 mètre (fourchette comprise entre 0.2 et 1 m).

Amérique du Nord

Il y a, en Amérique du Nord, toute une gamme de types de climats et une variabilité des conditions météorologiques qui constitue en soi un facteur de poids. L'évolution du climat au XX^e siècle s'est caractérisée par un pic des températures moyennes dans les années 40, puis par une baisse progressive jusqu'aux années 70, suivie d'une nouvelle hausse pour aboutir, de nos jours, à peu près au même niveau que dans les années 40. Les précipitations moyennes se sont graduellement accrues au cours du siècle, mais des réductions ont été observées dans certaines régions – surtout en Californie et dans les États septentrionaux des Montagnes rocheuses. On a également constaté une tendance générale à la hausse de la proportion des précipitations survenant dans des conditions météorologiques extrêmes, sauf au Canada. Bien que le niveau de la mer se soit généralement élevé, il a baissé dans certaines régions (surtout à cause du relèvement post-glaciaire).

Le GIEC indique que les prévisions des températures moyennes sont très divergentes, alors qu'il y a une plus large convergence de vues en ce qui concerne les précipitations. Un doublement de la concentration de CO₂ fera davantage augmenter les températures hivernales que celles de l'été, mais la fourchette prévisionnelle est relativement large (1.4-4.8 °C pour l'hiver et 0-2.6 °C pour l'été). Il est prévu que la proportion des précipitations liées à des phénomènes météorologiques extrêmes augmentera encore, mais les avis divergent sur la question de savoir

s'il s'agira de tempêtes plus fréquentes ou plus violentes. Les différences actuelles de l'élévation du niveau de la mer selon les régions devraient persister, le niveau montant plus rapidement dans le golfe du Mexique et dans les parties centrale et méridionale du littoral atlantique.

Les modèles ne peuvent donner que des orientations générales sur les mesures que l'on pourrait prendre face aux tendances prévues, et à fortiori sur celles qui le seront probablement. Les superficies aptes au peuplement forestier s'étendront, en général, mais il y a une grande différence entre une zone apte et le couvert forestier actuel à cause des activités humaines. On devrait normalement assister à un déplacement des types de forêts vers le nord, ce qui ne sera pas facile en raison de la discontinuité du couvert forestier et du fait que le processus sera sans doute trop rapide pour nombre d'espèces ; néanmoins, l'intervention de l'homme pourrait l'accélérer. La toundra et les tourbières se déplaceront aussi vers le nord et les régions concernées risquent de se transformer de « puits » nets en sources nettes d'émissions de carbone. La distribution des embâcles de glaces changera – en général, leur fréquence ou leur importance diminuera –, mais il pourrait s'en produire davantage dans certaines régions.

Dans l'ensemble, la productivité agricole en Amérique du Nord bénéficiera du changement climatique prévu : une concentration accrue de CO₂ et le réchauffement accompagnés de plus fortes pluies feront augmenter la production ; même si les précipitations étaient légèrement inférieures, des gains seraient enregistrés. Cependant, certains coûts risquent de les contrebalancer si la variation des moyennes pluviométriques s'accroît et que des phénomènes météorologiques extrêmes surviennent plus souvent ou sont plus intenses. Dans certaines régions, notamment le Mexique, qui connaissent déjà des pénuries d'eau dont pâtit la production agricole et où les précipitations peuvent diminuer, la productivité risque de baisser, même sans tenir compte des phénomènes météorologiques extrêmes.

Aux États-Unis et au Canada, une hausse de 0,5 mètre du niveau de la mer menace⁹⁰, estime-t-on, entre 8 500 et 19 000 km² de terre ferme, dont un cinquième à un quart sont des terrains en exploitation. Cette même élévation entraînerait une perte nette de 17 à 43 pour cent des terres humides du littoral. Les bassins hydrographiques risquent d'être sérieusement touchés : il est possible que les précipitations diminuent pendant l'été et probable que l'évapotranspiration augmente. En conséquence, il sera plus difficile de gérer le transport fluvial ; en outre, les inondations seront peut-être plus fréquentes et plus graves.

Asie tempérée

Cette région comprend notamment la Chine ; peu d'informations spécifiques sur le Japon et la Corée sont présentées. Les températures moyennes dans la

région se sont élevées de 1 °C en un siècle, mais cette hausse n'est pas uniformément répartie : les températures ont surtout augmenté en hiver, mais très légèrement dans les autres saisons. Cette augmentation est plus rapide depuis les années 70. Quant aux moyennes pluviométriques, elles se sont accrues en Corée, mais ont diminué au Japon (sur un siècle, respectivement, +10 à +20 pour cent et -10 à -20 pour cent).

A l'échelon régional, la hausse des températures moyennes devrait se situer entre 1 °C et 3.5 °C d'ici à 2100, mais les prévisions au niveau subrégional sont très peu fiables. Une source d'incertitude importante est l'influence des aérosols (qui proviennent principalement des émissions soufrées) ; certaines simulations prévoient un refroidissement en été dans certaines parties de la Chine. L'importance de la mousson, des typhons et du phénomène El Niño/La Niña rend beaucoup plus incertaines les prévisions concernant les précipitations ; en général, on s'attend à une diminution, mais elles pourraient bien augmenter.

En Russie, la zone de la toundra régressera sensiblement par suite de l'extension des prairies et du maquis, ainsi que du déplacement des forêts vers le nord en Russie et en Chine. On ne voit pas bien quelles en seront les incidences sur la productivité agricole ; faute de mesures d'adaptation, les rendements pourraient diminuer, en particulier s'il survient des pénuries d'eau, ce qui est possible en Chine notamment, mais l'effet de fertilisation par le carbone peut plus que compenser ces déficits.

La montée du niveau de la mer peut avoir de graves conséquences au Japon. Le rapport du GIEC signale que trois grands centres économiques de ce pays – Tokyo, Osaka et Nagoya – ont de vastes zones côtières à très basse altitude. Deux millions de personnes résident actuellement en dessous du niveau moyen des marées hautes. Si le niveau de la mer s'élève d'un mètre (la valeur haute de la fourchette habituellement citée pour la seconde moitié du XXI^e siècle), ce chiffre sera porté à 4.1 millions ; la même hausse ferait passer la superficie des zones sujettes aux inondations à 8 900 km², contre 6 270 km² à l'heure actuelle⁹¹. Selon ce rapport, une hausse de 30 cm du niveau de la mer ferait disparaître plus de la moitié des plages de sable du Japon et leur disparition serait presque complète si la mer montait d'un mètre ; au cours des 70 années écoulées, un tiers environ de la superficie des plages a été recouverte par la mer. Une bonne part du littoral chinois est menacé également.

Quant aux phénomènes météorologiques extrêmes, bien qu'ils puissent prendre de l'ampleur à l'avenir (le rapport n'avance pas de preuves convaincantes à cet égard en Asie tempérée), on constate par exemple que le nombre de décès dus aux typhons est en recul depuis la seconde guerre mondiale, grâce aux mesures d'alerte et de prévention qui ont été prises.

Australasie

Cette région comprend l'Australie, la Nouvelle-Zélande et les îles périphériques. Il est à noter que, dans les conditions climatiques actuelles, la variation des moyennes pluviométriques annuelles en Australie (en particulier dans le nord) est l'une des plus fortes du monde. La fréquence et la durée des sécheresses (et des inondations, à l'autre extrême) sont grandes. Dans la mesure où les climats des autres pays de l'OCDE s'orientent dans ce sens, l'Australie est peut-être à même de transmettre des enseignements utiles à d'autres pays en matière de prévention et d'adaptation.

L'Australasie a connu un réchauffement un peu plus rapide que la moyenne mondiale, les taux les plus élevés ayant été enregistrés depuis 1950. La fourchette diurne est en baisse, comme partout ailleurs. La moyenne pluviométrique et la fréquence des fortes pluies semblent avoir augmenté, en général. En Australie, ces phénomènes se sont accentués le plus sur la côte Est, mais ils ont diminué quelque peu dans le sud-ouest et dans certaines zones à l'intérieur des terres. Les fortes pluies sont étroitement liées aux fluctuations d'El Niño. Le niveau de la mer est monté d'environ 2 mm par an au cours des 50 dernières années.

On prévoit des hausses des températures de 0.3 °C à 1.4 °C en Australie et en Nouvelle-Zélande d'ici à 2030, et le double pour 2070. Les prévisions concernant les précipitations en Australie sont incertaines, celles-ci peuvent augmenter ou diminuer, le bilan des probabilités laissant à penser qu'elles baisseront. En Nouvelle-Zélande, une plus grande fréquence des vents d'ouest dominants risque d'accroître les précipitations dans l'ouest du pays et de les réduire à l'est⁹².

De fortes pluies plus fréquentes provoqueront des inondations, mais n'amélioreront sans doute pas la situation générale de l'eau en Australie. En Nouvelle-Zélande, des températures plus élevées et une concentration atmosphérique plus forte de CO₂ feront généralement augmenter les rendements. Dans les zones boisées, la croissance de la végétation peut s'accélérer, mais les espaces forestiers seront certainement plus exposés aux incendies, de sorte que l'effet net sur le couvert forestier est incertain.

L'élévation du niveau de la mer pose surtout des problèmes dans les îles périphériques, bien que nombre de zones urbaines et de plages ainsi qu'un parc national au moins soient également menacés. De fortes pluies risquent d'entraîner des inondations plus importantes. On dispose d'un large éventail d'estimations des variations des taux de ruissellement et on s'attend à une grande variabilité. Il est prévu que le manteau neigeux régressera en Australie et en Nouvelle-Zélande.

Europe

L'Europe (délimitée à l'est par les monts Oural et la mer Caspienne) présente de grandes disparités climatiques intrarégionales. Elle a aussi connu, au cours du

siècle écoulé, des évolutions du climat assez diverses : un certain réchauffement s'est produit presque partout, mais on a observé un léger refroidissement en quelques endroits (Grèce et certaines parties de l'Europe orientale). Une bande qui s'étend de l'Espagne jusqu'à la Russie, en passant par l'Europe centrale, s'est beaucoup réchauffée. En général, les précipitations ont augmenté dans le nord et baissé dans le sud.

Les prévisions ne sont pas jugées très fiables. Une hausse générale des températures hivernales est prévue : elle se situerait entre 1.5 °C et 4 °C selon la région et le modèle utilisé. Les températures estivales risquent d'augmenter de 4.5 °C au maximum, la marge d'incertitude étant plus grande que pour l'hiver. Les effets des aérosols sont particulièrement importants (et incertains) en Europe centrale – ils pourraient neutraliser la moitié de la hausse des températures due au CO₂. Dans l'ensemble, les précipitations aussi devraient augmenter, en particulier l'hiver dans le nord. Pour l'été, certains modèles font état d'un accroissement, d'autres d'une diminution⁹³.

La productivité agricole devrait sans doute bénéficier globalement de ces évolutions, mais pas forcément sur tout le territoire de l'Europe ; l'interaction des variations des températures et de la pluviosité moyenne, ainsi que leur répartition dans le temps, seront essentielles. Il est probable que la croissance des forêts s'accélénera (une certaine progression semble déjà se confirmer), encore que le déplacement des zones aptes au peuplement de diverses espèces d'arbres risque d'être trop rapide pour les types de forêts concernés. Par ailleurs, certaines zones deviendront plus vulnérables aux incendies. Les régions productrices de tourbe verront leur production réduite et les tourbières pourraient se transformer en marécages. Nombre de zones humides risquent de devenir des sources d'émission, après avoir été des « puits » de carbone. Plusieurs côtes et terres humides du littoral sont vulnérables.

De nombreux glaciers disparaîtront complètement et le manteau neigeux en hiver se réduira dans plusieurs régions. La principale conséquence des évolutions des précipitations sera sans doute un ruissellement moindre en été et plus important en hiver, même si les moyennes pluviométriques annuelles croissent – la hausse des précipitations se produira principalement en hiver et l'évapotranspiration⁹⁴ augmentera. Cela aggravera les inondations, surtout parce que la plupart des plaines d'inondation sont déjà « surpeuplées » ; il y aura aussi davantage d'inondations des plaines littorales par suite de raz de marée, compte tenu de l'élévation du niveau de la mer et de la probabilité d'une fréquence accrue des tempêtes.

5.2. Incidences sectorielles

Le degré d'imprécision des prévisions concernant les paramètres climatiques, même les plus élémentaires, est tel que l'on peut affirmer très peu de choses avec

certitude sur les incidences dans des secteurs précis, sauf lorsqu'il s'agit des répercussions de l'élévation du niveau de la mer. La présente section aborde toutefois les différentes sortes d'effets auxquels on pourrait s'attendre et les domaines d'incertitude possibles.

Dans tous ces domaines, on constate un écart frappant entre les prévisions disponibles, qui sont quelque peu hypothétiques et souvent qualitatives plutôt que quantitatives, et les informations nécessaires pour attribuer des prix fictifs (qui peuvent varier en fonction de la situation et des préférences des différents pays) à ces incidences de manière à affiner l'analyse coûts-bénéfices des politiques en matière de changement climatique.

Agriculture

Dans la plupart des pays de l'OCDE (peut-être à l'exception de l'Australie), le réchauffement du climat sera sans doute à l'origine de rendements agricoles plus élevés, à moins que les ressources en eau soient insuffisantes. Cette contrainte tient, pour une très bonne part, à la répartition géographique et saisonnière des précipitations, ainsi qu'aux températures elles-mêmes (qui influent sur le rythme de l'évapotranspiration) ; or, les prévisions en la matière sont très incertaines. Le rythme de la photosynthèse s'accélère assez sensiblement pour nombre de cultures (et d'arbres) lorsque la concentration atmosphérique de CO₂ s'accroît. Des conditions météorologiques plus sèches et plus chaudes dans certaines régions risquent toutefois d'entraîner des pertes de terres agricoles, mais on peut supposer que le retrait vers le nord de la toundra et de la zone de pergélisol au Canada, en Europe septentrionale et en Russie fera reculer la limite des terres cultivées vers le nord. Aux États-Unis et au Canada, et éventuellement dans la majeure partie de l'Europe, au Japon, en Corée et en Nouvelle-Zélande, il y a des chances que le changement climatique fasse augmenter, en moyenne, les rendements agricoles (avec de grandes différences locales, sans aucun doute). Cette tendance serait contrecarrée en cas de multiplication des phénomènes météorologiques extrêmes (tempêtes, inondations, vagues de chaleur, sécheresses).

Pêcheries

La principale incidence sur les pêches côtières est la perte potentielle, par suite de la montée du niveau de la mer, de terres humides du littoral qui constituent des sites de reproduction et fournissent des substances nutritives. Dans une grande mesure, l'ampleur de cette perte dépendra des stratégies choisies pour faire face à la hausse du niveau de la mer car, dans la plupart des cas, ces zones se déplaceront vers l'intérieur des terres au fur et à mesure que le niveau de la mer s'élèvera. On ne prévoit pas d'effets néfastes sur les pêcheries, mis à part le fait que la hausse de la température de l'eau puisse entraîner la migration de certaines

espèces. Comme le fait observer le rapport du GIEC, la surexploitation des fonds de pêche et l'intervention de l'homme auront probablement plus d'influence sur les pêcheries que le changement climatique.

Transports

Seul le transport par eau semble susceptible de subir directement les effets du changement climatique. Les modifications des précipitations et la variation des moyennes pluviométriques influenceront sur le transport fluvial ; les prévisions du GIEC pour l'Amérique du Nord et l'Europe semblent indiquer que les pluies seront plus fortes au printemps et plus faibles pendant le reste de l'année, ce qui réduirait le débit des voies navigables. A long terme, il va de soi que nombre d'installations portuaires seront inondées si le niveau de la mer monte. En revanche, les ports qui sont actuellement fermés ou perturbés à cause des formations de glaces saisonnières bénéficieront du changement climatique, d'une manière générale.

Eau

Dans les régions où une hausse des températures s'accompagnera d'une baisse des précipitations, les pressions exercées sur les ressources en eau, tant au plan qualitatif que quantitatif, risquent de s'accroître. Pour la plupart des pays de l'OCDE, il s'agira d'un problème exclusivement national, bien que les droits sur l'eau puissent poser un problème transfrontalier, par exemple entre les pays situés en bordure du Rhin en Europe. Dans certaines régions, les tensions entre les usages résidentiels, industriels et agricoles (voir plus haut) de l'eau risquent de s'aggraver. En ce qui concerne l'agriculture, les modifications de la répartition géographique des précipitations pourraient avoir des incidences importantes, mais les connaissances en la matière sont très lacunaires.

Énergie

Il y a tout lieu de penser que la demande d'énergie pour le chauffage sera relativement moindre, et qu'elle augmentera plutôt pour la réfrigération et la climatisation. Par rapport aux tendances induites par les évolutions des préférences des consommateurs, de la richesse et de la technologie, ces infléchissements seront insignifiants. Les modifications des régimes pluviométriques auront peut-être des effets sur la production hydroélectrique, sans doute dans le sens d'une réduction du potentiel, s'il se confirme une tendance à la hausse des précipitations au printemps et à la baisse pendant d'autres périodes de l'année ; un avantage temporaire, mais peut-être prolongé, peut découler de l'accroissement du débit des cours d'eau dû à la fonte des glaciers.

Assurances

Le secteur des assurances doit son existence à l'incertitude. Si le réchauffement de la planète accroît la variabilité des conditions météorologiques, et en particulier la fréquence des tempêtes et des inondations, le secteur des assurances risque de se trouver confronté à une demande accrue⁹⁵. Au fil de cette évolution, il devra toutefois porter une attention particulière aux méthodes de calcul des risques – en effet, les moyennes rétrospectives peuvent induire en erreur.

Tourisme

Le secteur du tourisme risque surtout d'être touché par une réduction de l'enneigement portant préjudice aux sports d'hiver. Par ailleurs, une hausse sensible du niveau de la mer réduira la superficie des plages existantes, à moins qu'elles puissent, ou qu'on les laisse, s'étendre vers l'intérieur des terres. Cette fois encore, il semble peu probable qu'une telle évolution soit assez rapide pour être perceptible, en comparaison des changements qui seront sans doute induits par la demande.

Mouvements migratoires

Étant donné que certains littoraux ou estuaires seraient submergés par la mer si son niveau montait, certains mouvements migratoires deviendraient indispensables. Au cours des 100 prochaines années, la hausse maximum prévue d'un mètre ne devrait cependant pas exercer de si fortes pressions dans les pays de l'OCDE. On peut s'attendre à une pression démographique plus importante d'immigration provenant de pays non membres de l'OCDE qui pâtiront davantage, comparative-ment, des conséquences du changement climatique. Néanmoins, on dispose de peu d'informations permettant de prédire ces pressions ; les populations de certaines régions d'Afrique sont parmi les plus vulnérables au changement climatique mais, bien que les prévisions du GIEC annoncent un réchauffement dans tout le continent, rien ne permet d'affirmer que les précipitations augmenteront ou diminueront. De même, le GIEC indique que les rendements agricoles actuels ne représentent que la moitié environ du potentiel, d'où l'on peut penser qu'une baisse de potentiel n'entraînera pas nécessairement une régression des rendements effectifs. Quant aux mouvements de population dus à la hausse du niveau de la mer, on pense que le Bangladesh serait particulièrement vulnérable.

Santé

Selon toute vraisemblance, la seule incidence du réchauffement qui se fera sentir de façon systématique dans le domaine de la santé sera une propagation géographique accrue des maladies à transmission vectorielle, car les climats

deviendront plus favorables à la prolifération de moustiques et d'autres insectes vecteurs de maladies. On pourrait certes s'attendre à moins de décès en hiver, alors que la chaleur en causerait davantage, mais ce n'est pas certain car ce sont plutôt les écarts de température, et non les températures moyennes, qui les provoquent. On a également fait observer que l'accroissement du nombre de décès dus à la chaleur serait plus important que la baisse du nombre de décès en hiver, car les premiers sont plus étroitement liés à la température (Kupnick, 1998).

A en juger par les préférences manifestes de la population concernant les lieux de vacances et, en Amérique du Nord du moins, de retraite, la plupart des habitants des pays tempérés de l'OCDE choisissent généralement des conditions météorologiques plus chaudes. A moins qu'il ne s'agisse d'une préférence plus relative qu'absolue, on peut supposer que le réchauffement améliorera le bien-être de nombreuses personnes, ce qui compensera éventuellement certains des risques accrus pour la santé.

Biodiversité

L'influence du réchauffement de la planète proprement dit (contrairement à celle de la croissance économique, de l'industrialisation de l'agriculture, etc.) sur la biodiversité n'est pas évidente (mais on peut noter que la biodiversité elle-même exerce une influence sur l'aptitude des écosystèmes à s'adapter au changement climatique). La destruction de certains habitats (par exemple, récifs de corail ou espaces forestiers) occasionnera des pertes, mais il est difficile d'affirmer dans quelle mesure elles seront contrebalancées par la migration et l'adaptation des espèces.

5.3. « Études d'impact » nationales

Il faut, pour pouvoir fournir des indications plus précises sur l'évolution probable des conditions météorologiques dans des régions ou pays donnés, une résolution géographique plus poussée que celle réalisable en ayant recours aux modèles climatiques mondiaux auxquels font référence les paragraphes précédents. Pour ce faire, il est possible, entre autres, d'utiliser des modèles plus détaillés limités à une région, calibrés de manière à reproduire les résultats d'un modèle mondial pour la région en question. Grâce à cette méthode, des études d'impact plus précises, bien qu'encore préliminaires, ont récemment été réalisées pour la France et le Royaume-Uni⁹⁶. Signalons que peu d'autres pays ont effectué des études de ce type, du moins à la connaissance du Secrétariat.

Le rapport du Royaume-Uni – fondé sur la poursuite de l'évolution actuelle des émissions – parle d'un déplacement général vers le nord des distributions de température qui aboutira dans les années 2050 à des températures dans le sud du pays équivalentes à celles enregistrées aujourd'hui dans le sud de la France. Alors

qu'on prévoit une augmentation générale des précipitations, il se peut qu'on assiste dans le sud-est déjà (relativement !) sec à une nette diminution des pluies estivales ; cette moindre pluviométrie, associée à des températures plus élevées et à des vents plus forts, pourrait se traduire par une modification radicale des paysages, en augmentant la tendance à l'érosion des sols, et une dégradation des fondations de nombreux édifices existants. Le rapport du Royaume-Uni attire également l'attention sur les risques d'inondation des terres sur le littoral ainsi que peut-être, élément plus important, la disparition de basses-terres agricoles de qualité en raison de l'augmentation de leur salinité. Les terres agricoles ne seraient pas seules affectées ; en effet, la plupart des raffineries pétrolières et des centrales nucléaires du Royaume-Uni sont vulnérables à une élévation du niveau de la mer. De nombreux systèmes écologiques seraient menacés en partie du fait de la vitesse des changements prévus et aussi en raison des obstacles à la migration des espèces. On prévoit, d'autre part, que les tempêtes et autres phénomènes extrêmes causeront plus de dégâts. A ce stade, le rapport ne cherche pas à évaluer les coûts économiques globaux des différents aspects de cette évolution prévue.

Le rapport français qui ne comporte aucune simulation des départements et territoires d'outremer, prévoit aussi une certaine variation régionale des incidences en grande partie due aux précipitations ; néanmoins, on observe un déplacement plus ou moins systématique des zones de températures vers le nord (bien que l'écart entre les températures moyennes au nord et au sud puisse se creuser légèrement). La production agricole peut croître dans l'ensemble, sachant toutefois qu'il faudra modifier la répartition des cultures pour l'adapter aux sécheresses et aux orages de plus en plus fréquents. L'évolution des températures devrait entraîner le déplacement vers le nord des différents types de forêts mais non de toutes, faute d'eau ; le risque d'incendie croîtra dans la zone méditerranéenne. Des sols plus secs en été, en automne et en hiver (on prévoit une augmentation de l'humidité des sols au printemps) seront plus exposés à l'érosion et contribueront à épuiser les nappes aquifères souterraines. Le tourisme sera certainement touché, en particulier en raison de la réduction du domaine skiable dans les Alpes, mais le rapport ne laisse pas entrevoir forcément une dégradation de l'industrie du tourisme, en dépit de l'évolution inévitable des attraits relatifs des différentes zones.

Les deux rapports signalent une répercussion probable du changement climatique sur la santé, bien qu'il soit difficile de déterminer si les effets seront dans l'ensemble bénéfiques ou non. Les maladies associées au temps froid diminueraient, de toute évidence, tandis que les autres risques augmenteraient. Des températures plus élevées favoriseront sans nul doute l'apparition de maladies infectieuses et à transmission vectorielle dans tous les pays, de même que se développeront certainement les maladies associées à la pollution atmosphérique (la production d'ozone, qui favorise ces maladies, augmente avec la hausse des températures).

5.4. *Adaptation, coûts et catastrophe*

Le changement climatique ne manquera pas de se traduire par des coûts économiques pour certains secteurs même s'il pourra être bénéfique pour d'autres. De ce fait, il serait peut-être judicieux de consacrer des ressources soit à la réduction des émissions afin de stabiliser le climat, soit à l'adaptation au climat, une fois modifié, pour en réduire l'impact. Les chapitres 3 et 4 ayant traité de la réduction des émissions, cette section est consacrée à l'adaptation.

Adaptation

Par nature, les bénéfices associés à la réduction des émissions sont des biens publics, justifiant donc non seulement l'intervention des pouvoirs publics mais encore une coordination internationale des actions gouvernementales. En revanche, les forces du marché seront peut-être mieux à même d'opérer l'adaptation dans de nombreux cas. Toutefois, l'intervention du secteur public est justifiée lorsqu'il y a des externalités et les pouvoirs publics devront peut-être faciliter l'adaptation imposée par le marché en s'assurant que leur action ne fausse pas indûment les signaux de prix. Même dans les cas où des décisions orientées vers le marché peuvent être prises dans le principe, dans la pratique le délai nécessaire peut être si long que l'intervention des pouvoirs publics se révélera indispensable dans une certaine mesure. Quoi qu'il en soit, pour être sûr que les marchés réagissent, la politique des pouvoirs publics doit instaurer un cadre stable maintenant les décisions à long terme du secteur privé à l'abri de risques excessifs.

L'agriculture et les ressources en eau (notamment pour l'agriculture) sont des domaines où les politiques en vigueur dans certains pays peuvent aller à l'encontre d'une adaptation optimale. L'adaptation dans le secteur agricole comportera une modification de la répartition des cultures ainsi qu'éventuellement l'arrêt de l'exploitation de certaines terres. Les avantages des politiques de soutien en faveur de certaines cultures, ou de celles qui empêchent les changements d'affectation des sols, devront être mis en balance avec l'augmentation des coûts des mesures d'adaptation au changement climatique qu'elles risquent d'entraîner. Il faudra laisser évoluer les redevances acquittées pour l'eau en fonction de la modification des conditions d'approvisionnement générales ou saisonnières. L'adaptation du marché de l'énergie, du tourisme, des assurances et de bien d'autres secteurs peut être laissée sans danger aux mécanismes du marché, bien que l'action des pouvoirs publics doive peut-être aussi s'adapter, par exemple en veillant à ce que les sociétés d'assurance restent soumises à des règles prudentielles appropriées. De plus, ils sera essentiel pour les pouvoirs publics d'éviter d'adopter des politiques visant à soutenir des activités qui, à terme, ne sont pas écologiquement viables, mais qui bénéficient d'un appui politique.

Une des activités où l'intervention du secteur public est déjà prédominante est l'aménagement du littoral pour pallier l'élévation du niveau de la mer. Ce niveau augmente dans de nombreuses régions depuis quelque temps et certaines côtes subissent une érosion même sans l'augmentation en question. L'expérience accumulée dans ce domaine est donc importante.

Face au problème de l'élévation du niveau de la mer, il existe trois types de stratégies d'aménagement du littoral : adaptation, retraite planifiée, ou protection⁹⁷. La première de ces solutions consiste à ne pas chercher à protéger les installations existantes ou à enrayer l'érosion : les installations et les équipements sont adaptés aussi longtemps que cela est possible et abandonnés dès qu'ils deviennent inutilisables. La troisième stratégie consiste à protéger pleinement les installations en place par des digues, des ouvrages de défense, etc. tandis que la deuxième consiste à laisser les processus naturels faire leur œuvre, en supprimant ou abandonnant certaines installations à l'avance, en en protégeant d'autres lorsque les calculs démontrent la rentabilité de cette solution et éventuellement en freinant l'évolution de certaines zones susceptibles de devenir vulnérables à leur tour ou qui seront indispensables à l'adaptation dans l'avenir.

Même si la retraite planifiée semble le choix naturel, cette solution a rarement été utilisée dans la pratique⁹⁸. Pour ce faire, un grand nombre d'informations sont indispensables, notamment des prévisions de l'élévation du niveau de la mer, mais aussi des données sur les interactions locales – par exemple entre les zones littorales humides dont la surface risque de diminuer si les terres sèches sont protégées et les pêcheries qui dépendent souvent des zones humides, ainsi que des informations sur des variables économiques, comme la durée de vie prévisible des actifs et les délais d'exécution pour les investissements. Les conflits d'intérêt sont vraisemblables et le cadre législatif devra peut-être être adapté⁹⁹.

La législation relative à l'aménagement du littoral constitue un exemple d'encouragement à la planification à long terme. La plupart des pays maritimes ont des législations imposant que les États ou régions élaborent des programmes pour faire face à l'élévation du niveau de la mer¹⁰⁰.

Les modifications de température prévues ne justifieront pas, à elles seules, une intervention aussi large du secteur public dans l'aménagement du littoral, mais cet exemple peut être utile à la gestion de l'eau soit dans le cas d'une diminution importante des ressources, soit d'une multiplication des phénomènes naturels extrêmes pouvant se traduire par des inondations, des glissements de terrain, etc. L'aménagement urbain, les normes de construction et les politiques des transports peuvent contribuer à réduire la vulnérabilité future face à ces modifications. Lorsque, de toute évidence, il n'y a pas matière à intervention du secteur public, il peut être judicieux de vérifier que l'action des pouvoirs publics ne risque pas de limiter la capacité d'adaptation des différents agents.

Un autre aspect important de l'adaptation est la vitesse d'apparition du changement climatique. Un réchauffement de 2 à 3 degrés et une élévation du niveau de la mer d'environ 0.5 mètre d'ici la deuxième moitié du XXI^e siècle ne devraient pas engendrer de problèmes insurmontables d'adaptation à court terme de l'infrastructure économique. Ainsi, le GIEC mentionne des délais de 10 ans pour la planification et la construction d'importantes installations en Australie, comme des barrages et des ouvrages de protection contre les inondations ; ce délai semble assez court comparé à la vitesse attendue du changement climatique. En outre, le temps dont on dispose pour réagir à l'élévation du niveau de la mer est en principe suffisant pour permettre l'élaboration de politiques côtières adaptées¹⁰¹. Ces conclusions fournissent certes des raisons d'être optimiste mais, même si elles laissent entendre que les stratégies d'atténuation et d'adaptation sont envisageables, elles n'impliquent pas pour autant que les coûts de celles-ci seront faibles.

Coûts

Étant donné que les profils d'évolution future des émissions sont inconnus et que, même s'ils étaient connus, leurs conséquences précises sur le climat et les fluctuations climatiques resteraient inconnues, le calcul des coûts du changement climatique est un exercice extrêmement aléatoire. Dans de nombreux domaines, qu'il s'agisse d'aménagement du littoral, de ressources en eau ou de pêche, la pression exercée par le changement climatique sur les ressources a des chances d'être très faible en regard des pressions actuelles ou futures de la croissance démographique et du développement économique.

Un certain nombre de tentatives de calcul ont été néanmoins faites pour des pays ou des régions entières, en s'appuyant sur des hypothèses spécifiques sur les émissions ou l'amplitude du changement climatique. La complexité de cette tâche a exclu l'utilisation de techniques de modélisation jusqu'à présent ; en fait, les évaluations disponibles sont basées sur la collaboration d'experts¹⁰², ou d'autres sources ont été utilisées pour déterminer les coûts dans différents secteurs de l'économie¹⁰³. Ces calculs, d'une fiabilité incertaine par nature, indiquent que pour la plupart des pays de l'OCDE, les coûts du changement climatique ainsi définis resteront modérés jusqu'à la fin du XXI^e siècle. C'est ainsi que, selon une estimation, les coûts du doublement de la concentration de CO₂ dans la plupart des régions de l'OCDE devraient se situer entre 1.5 et 2 pour cent du PNB, seraient plus élevés pour l'Australasie, et pourraient atteindre de 5 à 10 pour cent du PNB en Asie et en Afrique¹⁰⁴. D'autres études ont donné des résultats du même ordre de grandeur. Même ces derniers chiffres, s'ils sont comparés aux augmentations éventuelles de productivité ne semblent pas énormes¹⁰⁵. Il est intéressant de noter que ces estimations semblent avoisiner le même ordre de grandeur que les coûts estimés de la stabilisation des niveaux de concentration d'ici la fin du XXI^e siècle à

condition que le profil d'évolution vers la stabilisation ne soit pas trop ambitieux (voir chapitre 4).

Ces estimations sont des points de référence utiles et constituent un point de départ essentiel lorsque l'on cherche à chiffrer les effets du changement climatique. Toutefois, elles sont discutables. Les chiffres, en effet, sont généralement fondés sur des hypothèses « héroïques » sur le coût unitaire de certains aspects du changement, ces chiffres étant ensuite cumulés pour obtenir l'impact global. En l'absence de modèles plus complets des interactions entre le climat et l'économie (dans un sens comme dans l'autre), il est peu vraisemblable qu'il soit possible de faire beaucoup mieux.

« L'approche ricardienne » est une autre solution possible qui, pour l'étude de l'agriculture, utilise des données transversales sur les performances agricoles dans les différentes zones climatiques en tentant d'apporter des corrections pour tenir compte des diverses influences, comme le niveau de stock de capital et le type de sol, afin de parvenir à isoler l'impact du climat sur la productivité agricole. Des études de ce type réalisées pour l'Inde, le Brésil et les États-Unis confirment les suppositions selon lesquelles, si l'on ne tient pas compte de la fertilisation par le carbone, l'impact sur l'agriculture des pays en développement serait dans l'ensemble beaucoup plus important que dans les pays de l'OCDE et que l'adaptation permettrait de réduire les dommages estimés d'un tiers, voire de 50 pour cent. Elles indiquent, d'autre part, que lorsque l'effet de la fertilisation par le carbone¹⁰⁶ est pris en compte, l'impact sur l'agriculture des pays en développement peut être quasiment nul dans l'ensemble (bien sûr, dans certaines zones cet impact peut être considérable)¹⁰⁷. Un autre élément intéressant ressort de ces études : la sensibilité des résultats agricoles au changement climatique ne dépend pas de l'intensité de capital.

Il serait envisageable d'adapter cette méthode à d'autres secteurs économiques ou à l'économie dans son ensemble, bien que l'agriculture soit exceptionnelle par la richesse des données fortement ventilées par zone géographique dont on dispose. Aucune étude de ce genre n'a été exécutée jusqu'à présent.

Incertitude

Le fait que ces deux approches ne tiennent pas compte de l'impact des incertitudes sur l'évaluation des coûts constitue certainement une objection plus grave à leur utilisation. En particulier, la distribution de probabilité des impacts est très certainement fortement biaisée : il existe un certain nombre de scénarios peu vraisemblables, mais potentiellement catastrophiques, même à moyen terme. L'effondrement d'une partie de la calotte glaciaire antarctique qui se traduirait par une remontée relativement rapide du niveau de la mer de plusieurs mètres (par opposition au scénario habituel d'une élévation d'un mètre au maximum sur l'ensemble

du siècle prochain), ainsi qu'une perturbation importante de la circulation thermohaline¹⁰⁸ dans l'Atlantique Nord et le Pacifique Nord susceptible de provoquer un refroidissement important et rapide des climats sur les côtes nord-est de ces océans, sont deux de ces scénarios qui pourraient concerner la plupart des pays de l'OCDE.

Bien qu'il n'existe pas de manière simple d'aborder des événements éventuels dont la probabilité est inconnue et dont les conséquences mêmes sont difficiles à cerner, il faut néanmoins en tenir compte¹⁰⁹. Même si l'on ne connaît pas les véritables probabilités de ces événements, on connaît par contre certains facteurs qui les déterminent, de sorte qu'il est possible d'adopter des plans d'action pour réduire ces probabilités. La Convention-cadre sur le changement climatique est l'exemple même d'une action entreprise en partie sur ces bases, du moins par un certain nombre des parties contractantes pour lesquelles les conséquences apparemment les plus vraisemblables d'un changement climatique peuvent être négatives sans être pour autant très graves¹¹⁰.

Sous l'influence de la CCNUCC ainsi que de la sensibilisation et de l'inquiétude accrues du public, les pays s'engagent progressivement dans des recherches plus coordonnées sur les incidences du changement climatique. Par exemple, le Royaume-Uni a mis en place un programme d'étude des incidences du climat et la France une Mission interministérielle de l'effet de serre. Ces différents programmes devraient dans l'avenir permettre de dresser un tableau plus complet sur lequel pourront être fondées les analyses.

Notes

1. Un bref glossaire est présenté après le chapitre 5 pour rappeler au lecteur la signification de certains des termes et sigles employés dans le présent document.
2. Le GIEC a été créé conjointement en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et par le Programme des Nations Unies pour l'environnement ; il suit l'évolution du climat mondial et assure la coordination d'un programme de travail visant à approfondir les connaissances scientifiques des mécanismes en jeu. Ses rapports d'évaluation résument le point de vue général sur l'effet probable des tendances actuelles des émissions sur les concentrations atmosphériques futures et sur les conséquences qui en découleront pour le climat. Le Deuxième Rapport d'évaluation conclut, après un examen exhaustif des données scientifiques et en admettant que l'on ne dispose pas de preuves déterminantes, qu'il y a une influence perceptible des activités humaines sur le climat, s'exerçant par le biais de l'effet de serre ; le rapport se penche également sur le profil d'évolution des émissions qui serait nécessaire pour stabiliser les concentrations atmosphériques à divers niveaux.
3. La plupart des informations présentées dans cette section proviennent du GIEC (1996).
4. La contribution d'un gaz au réchauffement de la planète dépend de sa concentration dans l'atmosphère et de son efficacité relative à piéger le rayonnement sortant. Le CO₂ provoque actuellement plus de 60 pour cent de l'effet de serre anthropogénique total, le méthane environ 20 pour cent, l'hémioxyde d'azote quelque 6 pour cent et les hydrocarbures partiellement fluorés 10 pour cent environ. Pour plus de détails et les réserves qui s'imposent concernant ces estimations, se reporter à la source GIEC (1996) tableau 4, pp. 92-93, et au texte qui l'accompagne.
5. Dans les textes scientifiques, le qualificatif « anthropogénique » renvoie aussi bien à ce qui est directement la conséquence d'une activité de l'homme (par exemple, brûler des combustibles fossiles pour produire de la chaleur ou se déplacer) qu'aux résultats de processus naturels qui ont été modifiés par une activité humaine (par exemple, planter des forêts). C'est cette signification qui a été retenue dans l'intégralité de cette publication.
6. Il est possible d'utiliser ces rapports dans des modèles simples pour donner une idée approximative de l'effet sur la concentration des variantes d'un profil d'évolution prévu des émissions, après avoir défini un scénario de référence (des émissions passées et prévues et des concentrations qui en découleraient) (comme au chapitre 4 ci-après, par exemple).

7. Citons, par exemple, les marges d'erreur prises pour hypothèses dans l'estimation du «bilan» du carbone des années 80 :

Sources et « puits » de CO₂ anthropogénique

Moyennes annuelles 1980-89, gigatonnes de carbone par an

	Quantité	Intervalle de confiance
Sources		
Combustibles fossiles et production de ciment	5.5	(0.5)
Changements d'affectation des sols	1.6	(1.0)
Total	7.1	(1.1)
« Puits »		
Atmosphère	3.3	(0.2)
Océan	2.0	(0.8)
Expansion forestière dans l'hémisphère Nord	0.5	(0.5)
« Puits » résiduel	1.3	(1.5)

Source : GIEC, 1996, p. 17, tableau 2.

8. En réalité, il faudrait les appeler pays de l'Annexe B, car c'est dans l'Annexe B au Protocole que figurent les objectifs d'émission. Parmi les pays de l'OCDE, la Corée, le Mexique et la Turquie ne sont pas mentionnés dans l'Annexe B.
9. Le Bélarus, la Bulgarie, la Croatie, l'Estonie, la Lettonie, la Lituanie, la Roumanie, la Russie, la Slovaquie, la Slovénie et l'Ukraine. Le Liechtenstein et Monaco y figurent aussi. La Turquie, bien qu'actuellement sur la liste des pays de l'Annexe 1, n'est pas Partie au Protocole de Kyoto.
10. Les coefficients de conversion sont fondés sur l'incidence estimée de chaque gaz en terme de réduction du rayonnement sortant, par rapport à l'incidence du CO₂. Une fois convertie en équivalent CO₂, la mesure elle-même est le poids du carbone contenu dans l'équivalent CO₂ ; 1 tonne de CO₂ contient 0.27 (= 12/44, soit le rapport du poids atomique du carbone au poids moléculaire du CO₂) tonnes de carbone.
11. Islande (+10 %) ; Australie (+8 %) ; Norvège (+1 %) : se reporter à l'Annexe B du Protocole. Le Protocole prévoit un plan de redistribution des quotas à l'intérieur de l'UE («partage de la charge»), qui n'a pas encore été déposé auprès de la CCNUCC ; aux termes de cet accord dans le cadre de l'UE, les objectifs des différents pays varient entre -21 % (Allemagne) et +27 % (Portugal).
12. Comme le laisse entendre le Protocole, la meilleure politique pour limiter les émissions consiste à réduire en premier lieu les subventions à la consommation de combustibles fossiles.
13. Dont il est respectivement question dans les Articles 17, 6 et 12 du Protocole.
14. Le Groupe d'experts de l'Annexe 1, qui se réunit sous les auspices de l'OCDE et de l'Agence internationale de l'énergie, mène les travaux préliminaires dans ce processus.
15. On emploie, dans le présent document, les termes de « permis » et de « quotas » qui ne sont pas utilisés dans le Protocole, mais qui expriment plus clairement que le texte de ce dernier les notions en jeu. Selon la définition donnée à l'Annexe B au Protocole, un objectif d'émission est une proportion des émissions totales de 1990, et il est désigné par l'expression « engagement[s] chiffré[s] en matière de limitation et de réduction » ; sur cette base, on peut calculer les limites d'émission en tonnes d'équivalent carbone.

Certains documents font référence aux échanges de droits d'émission en termes de « fractions des quantités attribuées », suivant la formulation du Protocole, et non de « permis ».

16. Les projets qui permettent d'augmenter les absorptions par les « puits » remplissent aussi les conditions requises.
17. En juin 1998, il y avait 113 projets en cours. Les pays où ils sont mis en œuvre sont des pays européens en transition ou des pays en développement, ces derniers étant presque tous d'Amérique latine. Voir *Joint Implementation Quarterly*, septembre 1998.
18. Le Protocole prévoit également des transferts de technologie et d'autres formes d'assistance vers les pays ne figurant pas à l'Annexe 1.
19. Voir Puhl (1998).
20. Échange de droits d'émission : « Tout échange de ce type vient en complément des mesures prises au niveau national pour [atteindre les objectifs de Kyoto] ».

« Mise en Œuvre Conjointe » : « Tout projet de ce type [doit permettre] une réduction des émissions par les sources, ou un renforcement des absorptions par les « puits », s'ajoutant à ceux qui pourraient être obtenus autrement ».

« L'acquisition d'unités de réduction des émissions [doit venir] en complément des mesures prises au niveau national... »
21. La proposition récente du Conseil de l'Union européenne en est un exemple (Union européenne – Le Conseil, 1999). Elle définit des limites pour les acquisitions nettes et les ventes nettes (« transferts ») de droits d'émission dans le cadre des trois mécanismes de flexibilité.
22. On connaît beaucoup moins bien les propriétés des gaz à effet de serre autres que le CO₂, notamment les composés fluorés, et les estimations des potentiels de réchauffement peuvent évoluer avec les progrès des connaissances. Néanmoins, pour la première période d'engagement, les coefficients de conversion sont fixés compte tenu du potentiel de réchauffement global mentionné dans le Protocole de Kyoto. Ce n'est qu'à partir de la deuxième période d'engagement que les révisions tenant compte de nouvelles informations modifieront les coefficients de pondération des gaz.
23. Gielen et Kram (1998), Reilly *et al.* (1998), Brown *et al.* (1999).
24. Se reporter, par exemple, à OCDE (1999c), pour un examen approfondi de ces questions.
25. Par exemple, OCDE (1999c).
26. Les entités qui dépassent les niveaux d'émission de SO₂ qu'elles ont le droit de rejeter doivent acquitter une amende de 2 000 dollars par tonne, alors que le prix d'un permis d'émission est de l'ordre de 100 dollars par tonne.
27. Si le non-respect n'est pas délibéré, mais tient plutôt, par exemple, à des erreurs d'estimation ou de choix des instruments les mesures à prendre pour y remédier comprendront vraisemblablement des mesures d'assistance pour aider le pays défaillant à améliorer ses moyens d'action, et non des sanctions. On trouve des dispositions de ce type dans le Protocole de Montréal, notamment.
28. Parmi les pays de l'Annexe 1 actuels, les vendeurs nets les plus probables sont certains des pays en transition, notamment la Russie et l'Ukraine.

29. Il est souvent fait allusion à la responsabilité du «vendeur». «Vendeur initial» («Issuer» en anglais) conviendrait peut-être mieux, car l'idée est que la responsabilité incombe au pays auquel le permis a été initialement attribué.
30. Ce qui accroît l'importance des débats sur la façon de tenir les registres des transactions de permis, sur les instances qui en seraient chargées, sur la fréquence de leur mise à jour et sur le degré de publicité qu'il faudrait donner à ces données.
31. On peut aussi imaginer plusieurs formules associant différemment la responsabilité de l'acheteur et du vendeur initial. S'il y avait des raisons sérieuses de craindre que le commerce des permis fasse augmenter les émissions mondiales, tant les acheteurs que les vendeurs initiaux pourraient être tenus pour pleinement responsables.
32. Il est à noter également que les solutions possibles dépendraient éventuellement de la décision de l'OMC de traiter ce commerce de permis comme étant des échanges de «produits» ou d'instruments financiers. Si elle considère qu'il s'agit de «produits», ces échanges devront être conformes à ses règles et le recours à des sanctions pour inciter les parties à respecter les engagements de Kyoto pourrait poser des difficultés. Il semble toutefois peu logique de classer les permis d'émission parmi les produits.
33. Un dispositif de ce type pourrait se dénommer «Norme CO₂», ou peut-être «Commission des gaz à effet de serre».
34. On observe cependant certaines différences, mais on estime que les erreurs ne dépassent pas +/-2 à 5 pour cent (Gielen et Kram, 1998).
35. Autres modèles utilisés : WorldScan, MIT-EPA, POLES, RICE, CETA, SGM, MS-MRT, GTEM, Merge, AIM, G-Cubed et Oxford. Pour les références, voir le glossaire. Certains d'entre eux s'appuient sur une description détaillée des caractéristiques techniques des choix de technologies énergétiques (approche «bottom up»), tandis que d'autres, dont le modèle GREEN du Secrétariat de l'OCDE, insistent davantage sur les propriétés d'équilibre général et considèrent les technologies énergétiques de façon plus globale (approche «top down»).
36. Même si la position actuelle des États-Unis dans le cadre des négociations suppose que le Protocole de Kyoto ne serait pas ratifié en l'absence de mécanismes de flexibilité.
37. Pour simplifier, la première période d'engagement est ramenée à l'année à mi-parcours, c'est-à-dire 2010, ce qui correspond à la configuration de certains des modèles considérés..
38. Parmi les États issus du démantèlement de l'Union soviétique, seules la Fédération de Russie et l'Ukraine ont signé le Protocole de Kyoto. Ces pays sont de loin les principaux émetteurs de la région CEI considérée par le modèle GREEN.
39. A titre indicatif, le prix mondial du pétrole exprimé en équivalent carbone s'élevait à 150 dollars par tonne en 1995.
40. D'après les résultats du modèle GREEN, les coûts marginaux de réduction ne sont pas moins élevés aux États-Unis que dans l'Union européenne et au Japon (tableau 4). L'explication tient au scénario de référence de GREEN qui suppose un accroissement des émissions plus prononcé aux États-Unis (2 pour cent en moyenne jusqu'en 2010) que dans l'Union européenne (1.2 pour cent) et au Japon (1.6 pour cent). En conséquence, l'ampleur de la réduction, par rapport au niveau d'émissions de référence, est relativement plus importante aux États-Unis que dans les autres pays Membres de l'OCDE. Les différents profils d'évolution des émissions retenus dans le scénario de

référence sont principalement dictés par la croissance démographique. Ce scénario est bien entendu affecté d'une certaine marge d'erreur, mais les écarts entre la croissance des émissions aux États-Unis, d'une part, et dans l'Union européenne, d'autre part, tels qu'anticipés dans le modèle GREEN (0.8 point de pourcentage en moyenne sur la période 1995-2010) sont à peu près conformes aux tendances enregistrées au début des années 90 (1.2 point de pourcentage). Si ces tendances ne se démentent pas au cours des quelques années à venir, l'effort que les États-Unis devraient fournir pour réduire leurs émissions conformément aux engagements pris à Kyoto serait beaucoup plus important que celui que devraient consentir l'Union européenne.

41. Certains modèles énumérés dans le tableau 4 prennent en considération les coûts d'ajustement (le modèle Oxford, par exemple) et font donc état de coûts économiques plus élevés pouvant aller jusqu'à 2 pour cent par an.
42. La plupart des modèles répertoriés dans le tableau 4 ne font pas état de taxes sur le carbone dans la CEI. L'augmentation de 4 pour cent des émissions de carbone indiquée par le modèle GREEN correspond à un effet indirect des limitations imposées dans les autres Parties visées à l'Annexe I.
43. Cependant, deux modèles font exception : le modèle macroéconomique d'Oxford et le modèle G-Cubed, ce dernier prenant en considération la rigidité des salaires nominaux (McKibbin, Ross, Shackleton et Wilcoxon, 1999).
44. Dans GREEN, la modélisation de la production obéit à une fonction putty/semi-putty et une distinction est établie entre le capital nouveau et le capital ancien (en place). Le degré de substitution associé au capital ancien est inférieur à celui du nouveau capital. De plus, le capital ancien n'est que partiellement mobile entre les secteurs.
45. Ce pourcentage est fonction du niveau de désagrégation du modèle employé. Compte tenu de la structure du modèle GREEN, les estimations de la réaffectation de la main-d'œuvre sont relativement faibles. En outre, la redistribution nécessaire est subordonnée à la répartition initiale de l'emploi et de la production entre secteurs, mais aussi à l'ampleur des divergences des prix relatifs, qui peuvent varier d'un pays ou d'une région à l'autre.
46. OCDE (1999a) et Turner *et al.* (1993), par exemple.
47. Correspond au prix à la consommation des « combustibles et de l'électricité » dans le modèle GREEN. Au Japon, l'effet sur les prix serait moins sensible dans la mesure où la composante non énergétique du prix moyen à la consommation des « combustibles et de l'électricité » est importante.
48. Comme alternative, une redistribution de ces revenus pourrait se faire par le biais de la diminution des taxes induisant des distorsions, ce qui réduirait les coûts économiques totaux des réductions des émissions de CO₂.
49. Y compris les fuites qui se produiraient dans la CEI en raison de l'« air chaud », bien que celles-ci n'ont finalement pas d'impact sur les concentrations compte tenu de la possibilité de constituer des « réserves d'émissions ».
50. Cette classification a été employée entre autres par Frankel (1998).
51. En général, les études ne font pas de distinction entre les échanges de droits d'émission et les projets dans le cadre de la « Mise en Œuvre Conjointe »: elles considèrent que ces deux instruments produisent les mêmes effets.
52. Dans le scénario simulé par Manne et Richels, une partie de la réduction des coûts est imputable à la mise en œuvre du « Mécanisme pour un Développement Propre ».

53. Dans le modèle GREEN, en général, les termes de l'échange se dégradent en défaveur des acheteurs de permis pour trois raisons :
1. GREEN considère que les mouvements de capitaux entre pays/régions demeurent constants en termes réels. Lorsque les pays achètent des permis à l'étranger, ils doivent réduire leurs importations et/ou accroître leurs exportations d'autres biens pour équilibrer leur balance des paiements. Comme de nombreux modèles, GREEN est fondé sur le postulat que les biens non énergétiques sont différenciés en fonction de leur origine (« spécification d'Armington »). Par conséquent, les pays déterminent les prix sur les marchés commerciaux et le rétablissement de la balance extérieure impose une dépréciation du taux de change réel, d'où la dégradation des termes de l'échange.
 2. En achetant des permis, les pays accroissent leurs importations de pétrole, ce qui entraîne le même type d'ajustement qu'en 1).
 3. Dans la mesure où, sous l'effet du commerce de permis entre les pays de l'Annexe 1, les réductions portent davantage sur le charbon que sur le pétrole, les prix internationaux de ce dernier produit augmentent.
- Dès lors que ces trois mécanismes fonctionnent dans le sens inverse, la CEI bénéficie d'une amélioration des termes de l'échange en sa faveur.
54. Voir Union européenne, Conseil (1999).
55. Voir Bollen *et al.*, 1998 ; Tulpulé, *et al.*, 1998 ; McKibbin *et al.*, 1998 ; Kainuma *et al.*, 1998 ; Administration des États-Unis, 1998.
56. D'après une étude préliminaire de l'Agence Internationale de l'Énergie (OCDE, 1999b), la proposition aurait pour effet, dans l'Union européenne, de plafonner les achats nets de droits d'émission à environ 42 pour cent de l'écart prévu entre les émissions prises en compte dans le scénario de référence et les objectifs du Protocole à l'horizon 2008-2012. En ce qui concerne les autres pays industriels, ce plafond se situerait aux alentours de 34 pour cent et la Russie serait dans l'impossibilité de vendre plus de 30 pour cent de son volume prévu d'« air chaud ».
57. Cette forte augmentation des coûts s'explique par le fait que le scénario qui prévoit un plafonnement est comparé avec une situation où le commerce de permis s'effectue à l'échelle mondiale (c'est-à-dire en supposant que le « Mécanisme pour un Développement Propre » fonctionne librement et que le commerce de permis n'est soumis à aucune contrainte). Cependant, la perte économique correspondante, en termes de PIB, demeure relativement modeste (45 milliards de dollars de 1990 en 2010).
58. En partant du principe que la rente économique bénéficie aux vendeurs de permis (voir ci-après).
59. Globalement, les ordres de grandeur retenus dans cette simulation concordent avec l'évaluation quantitative, réalisée par l'AIE (OCDE, 1999b), du volume des achats de permis plafonnés conformément à la proposition de l'UE (Union européenne, Conseil, 1999), compte tenu du fait que le mécanisme pour un développement « propre » n'est pas sollicité.
60. La limitation du recours au « Mécanisme pour un Développement Propre » pourrait avoir des répercussions plus importantes suivant qu'il est ou non appliqué à grande échelle. Dans le cas où ce mécanisme est mis en œuvre au maximum de son potentiel, les pays Membres de l'OCDE y recourraient bien davantage qu'aux deux autres en vue d'atteindre les objectifs que leur assigne le Protocole. Si le commerce de permis est

totalelement libre à l'échelle mondiale, les achats de permis d'émission par les pays Membres de l'OCDE représenteraient en 2010 environ 90 pour cent de leurs engagements de réduction par rapport au niveau de référence.

61. En supposant que la CEI bénéficie de la rente (voir ci-après).
62. Comme en témoignent les simulations du modèle GREEN, la proposition de l'Union européenne limiterait les ventes de la CEI à 47 millions de tonnes de carbone d'ici 2010 (environ un tiers de son volume total d'«air chaud»). Si les transferts d'émissions n'étaient pas restreints entre les pays de l'Annexe I, la CEI vendrait environ 400 millions de tonnes de carbone d'ici 2010. Ainsi, la proposition de l'Union européenne revient à diviser par dix à peu près les transferts entre les pays de l'Annexe I. D'après les résultats des simulations, cela annulerait presque complètement les gains d'efficience attendus du recours aux mécanismes de flexibilité.
63. Les effets sur le revenu réel dépendent des hypothèses alternatives quant à la distribution de la rente découlant de la limitation des échanges (Manne et Richels, 1998).
64. D'après le modèle SGM, par exemple, un système général d'échanges entre pays de l'Annexe I associé au mécanisme réduirait les coûts des États-Unis de 66 pour cent. En comparaison, des échanges limités aux seuls pays de l'Annexe I les réduiraient de 57 pour cent.
65. Pour entrer en vigueur, le Protocole doit être ratifié par au moins 55 pays, y compris par un groupe de Parties de l'Annexe I dont les émissions totalisent au moins 55 pour cent des émissions totales de CO₂ pour l'ensemble des pays de l'Annexe I en 1990.
66. A l'heure actuelle, les États-Unis subordonnent la ratification du Protocole à l'absence de toute limitation importante du commerce de permis et à la participation de certains grands pays en développement. Si l'on se réfère aux débats qui ont eu lieu lors de la quatrième réunion de la Conférence des Parties, il semble peu probable que cette deuxième condition soit remplie dans un futur proche.
67. Le modèle GREEN considère que les nouvelles technologies de remplacement sont susceptibles d'être utilisées après 2010. De même, il tient compte des rigidités de la rotation du capital (fonctions de production de type putty-clay). En revanche, le modèle ne prend pas en considération les possibilités d'anticipation des agents, et le fait qu'il procède par étapes de cinq ans réduit la variété des calendriers qui pourraient être envisagés.
68. Cela reflète notamment l'hypothèse selon laquelle aucune source d'énergie alternative n'est disponible avant 2030.
69. Ces évaluations ont été réalisées sur la base d'un taux d'actualisation de 3 pour cent.
70. Certains gaz présentent un potentiel de réchauffement beaucoup plus important que d'autres. Ainsi, le potentiel de réchauffement du SF₆ est 24 000 fois plus élevé que celui du CO₂.
71. Le modèle EPPA du MIT (Reilly *et al.*, 1998) et le modèle GTEM (Brown *et al.*, 1999) sont les seuls modèles à prendre en considération des gaz à effet de serre autres que le CO₂.
72. C'est-à-dire à la fin du XVIII^e siècle.
73. Cette étude a été réalisée avant la signature du Protocole de Kyoto. Elle analyse les implications des propositions soumises par les Parties visées à l'Annexe I lors de la troisième réunion de la Conférence des Parties.
74. Trois modèles ont été utilisés pour apprécier la validité des résultats. Ce texte s'appuie sur un modèle dérivé des travaux de Wigley (Wigley, 1993). Il est linéaire en ce sens que

le carbone demeurant dans l'atmosphère est exprimé au moyen d'une fonction linéaire des émissions initiales (c'est-à-dire sous forme de fraction) (voir l'Annexe 2).

75. Si l'on s'en tient au raisonnement qui sous-tend les modèles fondés sur la théorie des jeux, on peut avancer que certains signataires du Protocole de Kyoto (le Canada et la Fédération de Russie, par exemple) n'auraient jamais dû adhérer à un accord sur la réduction des émissions, dans la mesure où ils peuvent espérer retirer des avantages d'un réchauffement du climat.
76. Pas en tant que telles en tout cas, même si les dommages induits par les pollutions, à l'échelle locale notamment, sont bien entendu reconnus de diverses manières.
77. Cette idée de transition progressive vers un système d'attribution des droits d'émission par habitant a été débattue lors de la quatrième réunion de la Conférence des Parties (voir AIE, 1998).
78. En supposant que les pays qui ne sont pas tenus de limiter leurs émissions sont autorisés à vendre des permis sur la base de quotas égaux à leurs émissions dans le scénario de référence, ce qui correspond au potentiel maximum du « Mécanisme pour un Développement Propre ».
79. Il s'agit d'une estimation approximative des coûts induits par une coalition globale stable. Cependant, cette estimation peut être perçue comme minimale dans la mesure où des transferts supplémentaires devraient être prévus pour compenser l'incitation à ne pas participer correspondant aux « fuites de carbone ». Toutefois, on peut également la tenir pour maximale si l'on prenait en compte des avantages accessoires à l'échelle locale.
80. Sur la base d'un taux d'actualisation de 3 pour cent par an.
81. Dans les simulations, les coûts varient légèrement en fonction de la règle retenue, en raison de la dynamique de l'accumulation du capital, différente d'un pays/région à l'autre.
82. Sur la base d'un taux d'actualisation de 3 pour cent par an.
83. Il peut arriver que la diminution des coûts marginaux induite par l'achat de permis soit compensée par la détérioration des termes de l'échange liée au volume important des transactions. Voir Annexe 3.
84. Compte tenu du produit des ventes de permis.
85. Il s'agit en l'occurrence d'une estimation biaisée vers le bas, dans la mesure où il n'est pas tenu compte des « fuites de carbone » potentielles. Selon l'hypothèse retenue ici, les pays hors Annexe I reçoivent des montants correspondant aux pertes de revenu réel qu'ils enregistrent par rapport au scénario de référence. Cela étant, ces transferts n'annulent pas nécessairement complètement les incitations à rester hors de la coalition, les pays non participants étant susceptibles d'obtenir des gains en se tenant à l'écart de la coalition compte tenu des effets induits sur les échanges et les prix de l'énergie (qui se traduisent par des « fuites de carbone »). En principe, les paiements compensatoires destinés à assurer la stabilité de la coalition globale devraient être calculés de façon à correspondre à la différence entre le revenu réel du pays s'il reste en dehors de la coalition (qui peut être supérieur au revenu réel dans le scénario de référence) et son revenu réel s'il participe à la coalition globale. Cependant, d'après le modèle GREEN, les fuites de carbone ne sont pas très importantes, notamment lorsque la coalition regroupe tous les pays sauf un (voir p. 45 et l'encadré 4). Par contre, les avantages accessoires à l'échelle locale sont susceptibles de limiter les transferts financiers nécessaires pour inciter les pays à participer.

86. Ces gains sont liés au fait que certains pays hors Annexe I sont dédommagés de toutes les pertes qu'ils ont à subir, alors que les autres, dont les émissions ne sont pas plafonnées, peuvent accroître leur revenu réel en vendant des permis attribués sur la base de leurs émissions de référence (« Mécanisme pour un Développement Propre »).
87. Cela reflète l'hétérogénéité du groupe des pays hors Annexe I. En particulier, la règle des « droits acquis » reporte la charge des réductions sur les pays en développement où les coûts sont faibles (Chine et Inde), alors que les deux autres règles supposent que les pays semi-industrialisés consommateurs de pétrole (où les coûts marginaux de réduction sont plus élevés) contractent des engagements plus importants.
88. Afrique, Moyen-Orient et Asie aride, Asie tropicale, petits États insulaires, Arctique et Antarctique.
89. S'agissant du Mexique, du Japon et de la Corée, on ne peut guère déduire d'informations spécifiques des rapports régionaux car ces pays occupent une petite partie des régions auxquelles ils appartiennent (Amérique latine et Asie tempérée).
90. Dans le sens où les terres en question se trouvent à moins de 0.5 mètre au-dessus du niveau actuel des marées hautes.
91. Le rapport note également que les actifs implantés dans les zones en question valent respectivement 450 et 908 milliards de dollars, mais on ignore sur quelles bases cette évaluation a été calculée. Il serait plus utile de se référer à l'estimation de 80 milliards de dollars, montant qui serait nécessaire pour modifier les installations de protection contre les inondations afin de préserver la zone qui se trouve menacée.
92. Il est intéressant de noter que la précédente série de prévisions du GIEC pour la Nouvelle-Zélande annonçait le contraire – une moindre fréquence des vents d'ouest et, partant, un déséquilibre moins marqué entre les précipitations à l'est et à l'ouest. Ce changement tient au fait que l'on dispose de modèles plus détaillés de la circulation océanique.
93. Il pourrait survenir un changement climatique beaucoup plus spectaculaire et soudain en Europe si la circulation thermohaline de l'eau de l'Atlantique Nord (qui entraîne le Gulf Stream vers les côtes du nord-ouest de l'Europe) devait cesser ou diminuer nettement. On pense que la probabilité de cette évolution est très faible, compte tenu de l'ampleur du changement climatique que l'on estime susceptible de se produire au cours de la centaine d'années à venir.
94. Évaporation directe de l'eau à partir du sol et transpiration des plantes.
95. Le GIEC (1998) signale que le coût d'indemnisation des catastrophes en Australie représente pour le moins 12 pour cent des coûts des primes d'assurances non-vie, contre 2.5 pour cent dans le reste du monde – c'est la conséquence des phénomènes naturels dangereux, climatiques ou autres, relativement fréquents, et ce malgré l'absence d'assurances privées couvrant les logements et les petites entreprises contre les inondations. Cet écart pourrait s'expliquer, en partie, par les attitudes face au risque et l'organisation du secteur des assurances, et non par des risques différents ou plus graves.
96. Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (1998) et ministère de l'Environnement, des Transports et des Régions du Royaume-Uni (1998) respectivement.
97. Voir, par exemple, GIEC (1998) pp. 173-174 et pp. 302-303.
98. Le GIEC (1998) cite des expériences sur la côte Est de l'Angleterre où des digues ont été volontairement rompues, transformant des terres agricoles précédemment protégées en zones littorales humides ; il s'agit en fait de diminuer la pression sur les ouvra-

- ges de défense, afin d'atténuer les inondations et d'aider à rétablir un équilibre naturel dans les estuaires.
99. Certaines mesures adoptées par les États des États-Unis pour limiter les droits des propriétaires de terrains littoraux afin d'empêcher les plages et les zones humides de gagner du terrain ont dû être modifiées après des actions en justice. Voir GIEC (1998) page 303.
 100. Par exemple, le US Coastal Zone Management Act, le New Zealand Resource Management Act.
 101. GIEC (1996) page 133.
 102. Par exemple Mosley, M.P. (Dir. de pub.), *Climate Change in New Zealand* (1990), cité dans GIEC (1998).
 103. Fankhauser (1995) (et Fankhauser et Tol ,1997 et Fankhauser *et al.*, 1998) tiennent compte des coûts de réalisation des ouvrages de protection des côtes, de la disparition de terres sèches et de zones humides, de la disparition d'écosystèmes, des effets sur l'agriculture et la sylviculture, les secteurs de l'énergie et de l'eau, du coût de la variation de la mortalité ainsi que des coûts de la pollution atmosphérique, des migrations et des dommages causés par les ouragans. En principe, on suppose dans les estimations que des mesures d'adaptation optimales seront prises. On trouvera des indications de l'importance de cette hypothèse dans les études consacrées aux incidences sur l'agriculture qui révèlent que les «pertes de bien-être» sont souvent réduites de moitié dans l'hypothèse d'un effort d'adaptation par rapport à la situation de *statu quo*.
 104. Fankhauser, *et al.* (1998), citant leurs travaux antérieurs.
 105. Les rapports régionaux du GIEC ne donnent pas systématiquement les mêmes estimations de coûts même si certains d'entre eux citent les chiffres donnés par Fankhauser et Tol (1997). La seule étude consacrée à un pays qui est mentionnée concerne la Finlande pour laquelle les coûts pourraient n'avoisiner que 1 pour cent du PIB (Kuoppomaeki, 1996, cité dans GIEC, 1998).
 106. Voir glossaire.
 107. Voir Mendelsohn *et al.* (1994), Dinar *et al.* (1998). Une étude portant sur un certain nombre de pays européens et méditerranéens est en cours de réalisation.
 108. Voir glossaire.
 109. La méthode des «Tolerable Windows» est une technique envisageable pour étudier les incidences à long terme des politiques relatives au changement climatique. Elle est fondée sur un concept de modélisation inverse consistant à définir un risque futur inacceptable, fonction des concentrations futures de gaz à effet de serre, puis à remonter dans le temps pour trouver des profils d'évolution des émissions réalisables. Il suffit ensuite d'évaluer les coûts des politiques à mettre en place pour parvenir à ces objectifs en les opposant à l'ampleur du risque qu'elles permettent d'éviter. Elle ne permet pas d'écarter les problèmes engendrés par notre vaste méconnaissance du changement climatique futur, mais présente l'avantage d'être axée sur la réduction des risques (ou indicateurs de risque) et sur les coûts correspondants. Toth *et al.* (1998) concluent, entre autres, que même si différents profils d'évolution des émissions à court terme risquent de ne pas modifier sensiblement les coûts d'un éventuel changement climatique, ils peuvent avoir une incidence non négligeable si le rythme d'évolution du climat compte.
 110. Il existe bien d'autres raisons pour intervenir, notamment l'altruisme à l'égard de pays qui s'attendent à être plus durement frappés.

Bibliographie

- ADMINISTRATION DES ÉTATS-UNIS (1998),
«The Kyoto Protocol and the President's policies to address climate change», avant-projet, juillet.
- AIE (1998),
«Standing Group on Long-Term Co-Operation, COP4 Outcome», IEA/SLT(98)49, OCDE, Paris, 23 novembre.
- AIE (1999),
«A preliminary analysis of the EU Proposals on the Kyoto Mechanisms», note préparée par R. Baron, M. Bosi, A. Lanza et J. Pershing, 28 mai.
- BABIKER, M. et H.D. JACOBY (1999),
«Developing country effects of Kyoto-type emissions restrictions», polycopié, Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Massachusetts Institute of Technology.
- BANQUE MONDIALE (1997),
«Expanding the measure of wealth: indicators of environmentally sustainable development», *Study and Monography Series*, n° 7, pp. 40-65.
- BARRET, S. (1992),
«Conventions sur le changement climatique : aspects économiques des négociations», OCDE, Paris.
- BARRET, S. (1994),
«Self-enforcing international environmental agreements», *Oxford Economic Papers*, n° 46, pp. 878-94.
- BARRET, S. (1995),
«Trade restrictions in international environmental agreements», London Business School.
- BARRET, S. (1997),
«Heterogeneous international environmental agreements», dans C. Carraro (Dir. de publ.), *International Environmental Agreements: Strategic Policy Issues*, E. Elgar, Cheltenham.
- BAYAR, A.H. (1998),
Can Europe Reduce Unemployment Through Environmental Taxes ? A General Equilibrium Analysis, version préliminaire présentée à la Twelfth International Conference on Input-Output Techniques, International Input-Output Association, New York, mai.
- BERNSTEIN, P.M., W.D. MONTGOMERY et T.F. RUTHEFORD (1999),
«Global impacts of the Kyoto agreement: results from the MS-MRT Model», document présenté à la réunion d'experts du Groupe de travail III du GIEC, mai, La Haye.

- BOLLEN, J., A. GIELEN et H. TIMMER (1998),
« Compliance with the Kyoto Protocol », dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- BOLLEN, J., T. MANDERS et H. TIMMER (1999),
« Kyoto and carbon leakage: simulations with WordScan », photocopie, document présenté à la réunion d'experts du Groupe de travail III du GIEC, mai, La Haye.
- BOTTEON, M. et C. CARRARO (1998),
« Environmental coalitions with heterogeneous countries: burden-sharing and carbon leakages », *Nota di Lavoro* 24.98, mars.
- BROWN, S.D., D. KENNEDY, D. POLIDANO, K. WOFFENDEN, K. JAKEMAN, G. GRAHAM, F. JOTZO et B.S. FISHER (1999),
« Economic impacts of the Kyoto Protocol: accounting for the three major greenhouse gases », Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics (ABARE), *Research Report* 99.6, Canberra.
- BURNIAUX, J.M. (1998),
« How important is market power in achieving Kyoto: an assessment based on the GREEN model », dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- BURNIAUX, J.M., J. MARTIN, G. NICOLETTI et J. OLIVEIRA-MARTINS (1992),
« GREEN: a multi-sector multi-region dynamic general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions: a technical manual », *Documents de travail du Département des affaires économiques et statistiques de l'OCDE*, n° 116, Paris.
- BURNIAUX, J.M. et C. COMPLAINVILLE (1999),
« GREEN: a global model for quantifying the costs of policies to curb CO₂ emissions: an updated version », à paraître comme *Document de travail du Département des affaires économiques et statistiques de l'OCDE*.
- BURNIAUX, J.M. et J. OLIVEIRA-MARTINS (1999),
« Carbon emission leakages: an analytical general equilibrium view », (à paraître).
- CAO M., F.I. WOODWARD (1998),
"Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change", 21 May, Vol: 393, pp. 249-252.
- CAPROS, P. (1998),
« Economic and energy system implications of European CO₂ mitigation strategy: synthesis of results from model based analysis », dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur les modélisateurs du changement climatique), 17-18 septembre.
- CAPROS, P. et E. KOKKOLAKIS (1996),
« Energy efficiency and conversion decentralisation: evidence from the PRIMES model », International Workshop on Instruments for Environmental Improvement with Structural and Technological Change in the Electricity Sector, organisé conjointement par la Commission européenne, l'Agence internationale de l'énergie et l'OCDE, 9-10 septembre, Belgique.

- CAPROS, P., T. GEORGAKOPOULOS, D. VAN REGERMORTER, S. PROOST, T. SCHMIDT et K. CONRAD (1997),
« The GEM3-E3 model for the European Union », *Journal of Economic and Financial Modelling*, vol. 4, n° 2 et 3, double publication spéciale, pp. 51-160.
- CARRARO, C. (1998a),
« The structure of international environmental agreements », *Nota di Lavoro* 12.98, janvier.
- CARRARO, C. (1998b),
« Beyond Kyoto: A game theoretic perspective », dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- CARRARO, C. et D. SINISCALCO (1992),
« Transfers and commitments in international environmental negotiations », à paraître dans KG. Mäler (Dir. de publ.), *International Environmental Problems: an Economic Perspective*, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht.
- CARRARO, C. et D. SINISCALCO (1993),
« Strategies for the international protection of the environment », *Journal of Public Economics*, n° 52, pp. 309-28.
- CARRARO, C. et D. SINISCALCO (1995),
« Policy coordination for sustainability: commitments, transfers and linked negotiations », dans I. Goldin et A. Winters (Dir. de publ.), *The Economics of Sustainable Development*, Cambridge University Press, Cambridge.
- CARRARO, C. et F. MORICONI (1998),
« Endogenous formation of environmental coalitions », document préliminaire, janvier.
- CRIQUI, P. et al. (1996),
POLES 2.2, Commission européenne, DGXII, EUR 17538 EN.
- DINAR, A., R. MENDELSON, R. EVENSON, J. PARIKH, A. SANGHI, K. KUMASR, J. MCKINSEY et S. LONERGAN (1998),
« Measuring the impact of climate change on Indian agriculture », *World Bank Technical Paper* n° 402.
- ENTING, I.G., T.M.L. WIGLEY et M. HEIMANN (1994),
« Future emissions and concentrations of carbon dioxide: key ocean/atmosphere/land analysis », CSIRO division of atmospheric research technical paper, CSIRO, Australie.
- FANKHAUSER, S. (1995),
« Valuing climate change. The economics of the greenhouse », Londres, *Earthscan*.
- FANKHAUSER, S. et R. TOL. (1997),
« The social costs of climate change: the IPCC Second Assessment Report and beyond », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 1, n° 4, pp. 385-403.
- FANKHAUSER, S., R. TOL et D. PEARCE (1998),
« Extensions and alternatives to climate change impact valuation: on the critique of IPCC Working Group III's impact estimates », *Environment and Development Economics*, vol. 3, pp. 59-81.
- FRANKEL, J.A. (1998),
« What kind of research on climate change economics would be of greatest use to policy-makers? » dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.

- GEURTS, B., A. GIELEN, R. NAHUIS, P. TANG et H. TIMMER (1995),
«WorldScan: an economic world model for scenario analysis», *Review of WorldScan*, CPB, La Haye.
- GEURTS, B., A. GIELEN, R. NAHUIS, P. TANG et H. TIMMER (1997),
WorldScan: project report to the National Research Program on Global Air Pollution and Climate Change, Project n° XXX, Bilthoven, Pays-Bas.
- GIEC (1996),
«Climate Change 1995: the science of climate change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC», J.J Houghton, L.G. Meiro Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg et K. Maskell (Dir. de publ.), *Cambridge University Press*, Cambridge.
- GIEC (1998),
«The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability», un rapport spécial du IPCC pour le Groupe de travail II.
- GIELEN, A. et C. KOOPMANS (1998),
«The economic consequences of Kyoto», *CPB report*, vol. 98, n° 1, pp. 30-33.
- GIELEN, D. et T. KRAM (1998),
«The role of non-CO₂ greenhouse gas in meeting Kyoto targets», dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- GRUBB, M., A. MICHAELOVA, B. SWIFT, T. TIETENBERG, Z. ZHANG et F.T. JOSHUA (1998),
Greenhouse Gas Emissions Trading: defining the principles, modalities, rules and guidelines for verification, reporting and accountability, CNUCED.
- HA-DUONG, M., M.J. GRUBB et J.C. HOURCADE (1997),
«Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂ emission abatement», *Nature*, vol. 390, pp. 270-73.
- HAHN, R.W. (1984),
«Market power and transferable property rights», *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 99, pp. 753-765.
- HERTEL, T.W. (1997),
Global Trade Analysis: Modeling and Applications, Cambridge University Press, Cambridge.
- HOEL, M. (1991),
«Global environmental problems: the effects of unilateral actions taken by one country», *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 20, n° 1, pp. 55-70.
- JAIN, A.K., H.S. KHESHGI, M.I. HOFFERT et D.J. WUEBBLES (1995),
«Distribution of radiocarbon as a test of global carbon cycle models», *Global Biogeochem Cycles*, n° 9, pp. 153-66.
- JOINT IMPLEMENTATION QUARTERLY (1998),
Joint Implementation Network, Pays-Bas, septembre.
- KAINUMA, M., Y. MATSUOKA et T. MORITA (1998),
«Recent analysis of emission scenarios based on the AIM model», polycopié de l'exposé présenté à la Joint Meeting of the International Energy Workshop and the Energy Modeling Forum, Stanford University, 17-19 juin.
- KATSOULACOS, Y. (1997),
«R&D spillovers, R&D cooperation, innovation and international environmental

- agreements», dans C. Carraro, (Dir. de publ.) *International Environmental Agreements: Strategic Policy Issues*, E. Elgar, Cheltenham.
- KOLSTAD, C., M. LIGHT et T.F. RUTHEFORD (1999),
Coal Markets and the Kyoto Protocol, document préliminaire, avril.
- KUOPPOMAEMI, P. (1996),
 «Impact of climate change from a small Nordic country perspective», ETLA – The Research Institute of the Finnish Economy, Series B119, Helsinki.
- KUPNICK, A. (1998),
 «Climate change health risks and economics», *Resources for the Future*, Washington.
- LEE, H., J. OLIVEIRA-MARTINS et D. VAN DER MENSBRUGGHE (1994),
 «The OECD GREEN Model: an updated overview», *Document technique du Centre de développement de l'OCDE*, n° 97, août, Paris.
- MANNE, A., R. MENDELSON et R.G. RICHEL (1995),
 «MERGE – a model for evaluating regional and global effects of GHG reduction policies», *Energy Policy*, vol. 23, n° 1, pp. 17-34.
- MANNE, A. et R.G. RICHEL (1998),
 «The Kyoto Protocol: a cost-effective strategy for meeting environmental objectives?», dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- Mc KIBBIN, W.J. et P.J. WILCOXEN (1995),
 «The theoretical and empirical structure of the G.-Cubed Model». *Brooking Discussion Paper* dans *International Economics*, p. 118, The Brookings Institution, Washington DC.
- MCKIBBIN, W., R. SHACKLETON et P.J. WILCOXEN (1997),
 «The international trade and financial impacts of carbon emissions reductions», document préliminaire, août.
- MCKIBBIN, W., R. SHACKLETON et P.J. WILCOXEN (1998),
 «The potential effects of international carbon emissions permit trading under the Kyoto Protocol», dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- MCKIBBIN, W., M.T. ROSS, R. SHACKLETON et P.J. WILCOXEN (1999),
 «Emissions trading, capital flows and the Kyoto Protocol», document présenté à la réunion d'experts du Groupe de travail III du GIEC, mai, La Haye.
- MENDELSON, R., W.D. NORDHAUS et D. SHAW (1994),
 «The impact of global warming on agriculture: a Ricardian analysis», *American Economic Review*, vol. 84 pp. 753-71.
- MICHAELIS, L. (1996),
 «Reforming coal and electricity subsidies; policies and measures for common action», *Working Paper* n° 2, Annex I, Expert Group on the UN FCCC, OCDE/AIE, juillet, Paris.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DES TRANSPORTS ET DES RÉGIONS DU ROYAUME-UNI (1998),
 «Climate change impacts in the UK», Londres.
- MISSION INTERMINISTÉRIELLE DE L'EFFET DE SERRE (1998),
 «Impact potentiel du changement climatique en France au XXI^e siècle», Paris.

- MOSLEY, M.P. (1990) (Dir. de publ.),
«Climate change in New Zealand», ministère de l'Environnement de la Nouvelle-Zélande.
- MULLINS, F. (1998),
«International emissions trading under the Kyoto Protocol», Groupe d'experts des pays figurant à l'Annexe 1 de la CCNUCC, projet de document d'information, Direction de l'environnement, OCDE, 2 septembre.
- NILSSON, S. et W. SCHOPFHAUSER (1995),
«The carbon-sequestration potential of a global afforestation program», *Climatic Change*, n° 30, pp. 267-93.
- OCDE (1995),
Changement climatique, instruments économiques et distribution des revenus, Paris.
- OCDE (1996),
Perspectives de l'emploi, Paris, juillet.
- OCDE (1997a),
Réformer les subventions à l'énergie et aux transports: implications environnementales et économiques, Paris.
- OCDE (1997b),
«Environmental implications of energy and transport subsidies, volume 2, Supports to the coal industry and the electricity sector», OCDE/GD(97)155, Paris.
- OCDE (1997c),
«Environmental implications of energy and transport subsidies, volume 1, Scoping Study, Greenhouse gas impacts of Russian energy subsidies, Climate change impacts of subsidies to the energy sector in the USA», OCDE/GD(97)154, Paris.
- OCDE (1998a),
«Economic Modelling of Climate Change», OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- OCDE (1998b),
«Ensuring compliance with a global climate change agreement», ENV/EPOC(98)5/REV1, Paris.
- OCDE (1999a),
UEM : Faits, défis et politiques, Paris.
- OCDE (1999b),
«A preliminary analysis of the UE proposals on the Kyoto mechanisms», note préparée par R. Baron, M. Bosi, A. Lanza et J. Pershing, Agence internationale de l'énergie, Paris, mai.
- OCDE (1999c),
«International emissions trading under the Kyoto Protocol», document d'information de l'OCDE, ENV/EPOC(99)18/FINAL.
- OCDE (1999e),
«Utilisation de mesures commerciales dans le contexte des accords multilatéraux sur l'environnement: Rapport de synthèse sur trois études de cas», Groupe de travail conjoint sur les échanges et l'environnement, COM/ENV/TD998)127.

- PUHL, I. (1998),
« Status of research on project baselines under the UNFCCC and the Kyoto Protocol », document d'information de l'OCDE et de l'AIE.
- REILLY, J., R.G. PRINN, J. HARNISCH, J. FITZMAURICE, H.D. JACOBY, D. KICKLIGHTER, P.H. STONE, A.P. SOKOLOV et C. WANG (1998),
« Multi-gas assessment of the Kyoto Protocol », document préliminaire.
- SIEGENTHALER, U. et F. JOOS (1992),
« Use of a simple model for studying oceanic tracer distributions and the global carbon cycle », *Tellus*, n° 44, pp. 186-207.
- TOTH, F.L., G. PETSCHER-HELD et T. BRUCKNER (1998),
« Kyoto and the long-term climate stabilisation », dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- TULPULÉ, V., S. BROWN, J. LIM, C. POLIDANO, H. PANT et B.S. FISHER (1998),
« An economic assessment of the Kyoto Protocol using the global trade and environment model », dans *Economic Modelling of Climate Change*, OECD Workshop Report (rapport, en anglais seulement, de l'Atelier international de l'OCDE sur la modélisation du changement climatique), 17-18 septembre.
- TURNER, D., P. RICHARDSON et S. RAUFFET (1993),
« Le rôle des rigidités réelles et nominales dans l'ajustement macroéconomique : une étude comparative des économies des pays du G3 », *Revue économique de l'OCDE*, n° 21, hiver.
- TURNER, D., C. GIORNO, A. DE SERRES, A. VOURC'H et P. RICHARDSON (1998),
« The macroeconomic implications of ageing in a global context », *Documents de travail du Département des affaires économiques et statistiques de l'OCDE*, n° 193.
- UNION EUROPÉENNE – LE CONSEIL (1999),
Stratégie communautaire concernant les changements climatiques : Conclusions du Conseil, 8346/99, DGI, mai.
- WEYANT, J.P. et J.N. HILL (1999),
« Kyoto special issue, introduction and overview », à paraître dans *Energy Journal*, International Association for Energy Economics.
- WIGLEY, T.M.L. (1993),
« Balancing the global carbon budget. Implications for projections of future carbon dioxide concentration changes », *Tellus*, vol. 45, pp. 45-48.
- WIGLEY, T.M.L. (1997),
« Implications of recent CO₂ emission-limitation proposals for stabilization of atmospheric concentrations », *Nature*, vol. 390, 20 novembre.
- WIGLEY, T.M.L., R. RICHELIS et J.A. EDMONDS (1996),
« Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations », *Nature*, vol. 379, 18 janvier.
- WIGLEY, T.M.L., A.K. JAIN, F. JOOS, B.S. NYENZI et P.R. SHUKLA (1997),
« Incidences des propositions de limitation des émissions de CO₂ », Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Glossaire et abréviations

CCNUCC

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Établie à Rio de Janeiro en 1992.

Circulation thermohaline de l'eau des océans

Les courants entre les régions équatoriales et polaires, principalement provoqués par les différences de salinité, transportent de la chaleur vers les régions polaires. Le plus important traverse l'Atlantique Nord : l'eau chaude (proche de la surface) est entraînée vers le nord, tandis que l'eau froide (en profondeur) se dirige vers le sud. Sans ces courants, le Gulf Stream n'aurait pas son effet modérateur sur le climat de l'Europe occidentale.

COP

Conférence des Parties (à la CCNUCC).

Engagement chiffré en matière de limitation et de réduction

Émissions autorisées pour la période 2008-12 exprimées en pourcentage du niveau de 1990.

Évapotranspiration

La vapeur d'eau passe du sol à l'atmosphère, soit par évaporation directe, soit par émission à travers les feuilles des plantes après avoir été absorbée par celles-ci ; l'association de ces phénomènes est l'évapotranspiration.

Fertilisation par le carbone

Le rythme de la photosynthèse, et donc celui de la croissance de la végétation, est une fonction directe de la concentration atmosphérique de CO₂ pour la plupart des plantes dans des conditions de laboratoire, du moins jusqu'à un certain point et sous réserve que la croissance ne soit pas freinée par le manque de substances nutritives ou en raison de températures trop élevées. On ne sait pas de façon certaine jusqu'à quel point ce phénomène se produit dans des conditions naturelles, en particulier pour les arbres parvenus à maturité.

GIEC

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Instance créée conjointement en 1988 par le Programme des Nations Unies pour l'environnement et l'Organisation météorologique mondiale.

Modèles

Le document mentionne un certain nombre de modèles utilisés pour évaluer des aspects du changement climatique et les politiques le concernant :

AIM (Asian-Pacific Integrated Model) : modèle d'évaluation intégré comportant un modèle d'équilibre général récursif de l'économie mondiale, un modèle de prévision du réchauffement et un modèle de l'impact du réchauffement. Ce modèle a été mis au point par le National Institute for Environmental Studies et la Faculty of Engineering de l'Université de Kyoto.

CETA (Carbon Emissions Trajectory Assessment Model) : modèle d'évaluation des profils d'évolution des émissions de carbone mis au point par le Electric Power Research Institute.

EMF-16 : le Energy Modelling Forum (EMF) a été créé en 1976 à l'Université de Stanford afin d'offrir aux experts, analystes et décideurs dans le domaine de l'énergie un cadre de rencontre pour approfondir leurs connaissances des problèmes fondamentaux touchant à l'énergie. La seizième étude de l'EMF (EMF-16) qui paraîtra prochainement sera axée sur l'évaluation intégrée du changement climatique après Kyoto et s'intitule « Integrated Assessment of Climate Change : Post-Kyoto Analysis ».

EPPA (Emissions Projections and Policy Analysis Model) : modèle d'analyse des politiques et des projections relatives aux émissions – il s'agit d'un modèle d'équilibre général mis au point par le Massachusetts Institute of Technology.

G-Cubed : modèle d'équilibre général intertemporel, multisectoriel et multirégional, initialement mis au point par W. McKibbin et P.J. Wilcoxon (McKibbin et Wilcoxon, 1995) et actuellement utilisé par la Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis (McKibbin, Shackelton et Wilcoxon, 1998).

GEM-E3 : modèle d'équilibre général pour l'UE-14 (Capros *et al.*, 1997).

GRAPE (Global Relationship Assessment to Protect the Environment Model) : modèle d'évaluation générale des relations visant la protection de l'environnement, mis au point par le Institute of Applied Energy, le Research Institute of Innovative Technology for Earth et l'Université de Tokyo, Japon.

GTEM (Global Trade and Environment Model) : modèle d'équilibre général dynamique de l'économie mondiale mis au point par le Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics (ABARE : consulter le site web www.abare.gov.au).

MERGE (Model for Evaluating the Regional and Global Effects of greenhouse gas reduction policies) : modèle d'équilibre du marché, intertemporel, associant une représentation « bottom-up » des approvisionnements énergétiques et une représentation « top-down » du reste de l'économie, mis au point par A. Manne (Université de Stanford) et R.G. Richels (EPRI). Consulter le site www.stanford.edu/group/MERGE ou Manne, Mendelsohn et Richels, 1995.

MS-MRT : modèle d'équilibre général des échanges, multisectoriel et multirégional, mis au point par Charles River Associates. et T. Rutherford, à l'Université du Colorado.

Modèle d'Oxford : modèle macro-économique ciblé sur le court et le moyen terme.

POLES : modèle du système énergétique mondial utilisé par la Commission européenne (Criqui *et al.*, 1996).

PRIMES : modèle d'équilibre partiel du système énergétique européen (Capros et Kokkolakis, 1996).

RICE (Regional Integrated Climate and Economy Model) : modèle régional intégré de l'économie et du climat mis au point à l'Université de Yale.

SGM (Second Generation Model) : modèle de deuxième génération mis au point par le Batelle Pacific Northwest National Laboratory.

WorldScan : modèle (AGE) d'équilibre général dynamique récursif, multisectoriel et multirégional, de l'économie mondiale utilisé dans le cadre d'un projet financé par le ministère néerlandais de l'Environnement (VROM), le Netherlands Bureau of Economic Policy Analysis (CPB) et le National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). Pour une description du modèle, voir Geurts *et al.* (1995, 1997).

Période d'engagement

Période sur laquelle les émissions effectives sont comparées aux quantités attribuées pour vérifier que les plafonds d'émission sont respectés. La première s'étend de 2008 à 2012 et on prévoit que la suivante ira de 2013 à 2017.

Quantité attribuée

Émissions autorisées pendant la période 2008-12 en tonnes d'équivalent carbone.

Réunion des Parties

(au Protocole de Kyoto) : identique à la COP, mais où les pays n'ayant pas ratifié le Protocole ont le statut d'observateur. Il n'y aura pas de réunion des Parties tant que le Protocole de Kyoto n'aura pas été ratifié.

Avantages des échanges avec des sources d'énergie alternatives à long terme

Dans certaines conditions, des scénarios avec des échanges de permis d'émission simulés à l'aide du modèle GREEN se soldent globalement par des coûts aussi élevés, sinon plus, que dans le scénario correspondant sans échanges. C'est le cas du scénario avec échanges de droits d'émission tel que prévu par le Protocole de Kyoto en 2050 dans lequel, malgré un commerce de 350 millions de tonnes de carbone, le coût total de la réduction des émissions pour les pays de l'Annexe 1 est légèrement supérieur à celui que l'on obtient sans échanges (825 milliards de dollars de 1985, contre 821 milliards de dollars de 1985). Une situation analogue se produit en 2050 avec une distribution alternative des quotas d'émissions malgré des échanges entre la CEI et les autres pays de l'Annexe 1 de 1126 millions de tonnes de carbone, l'équilibre, échanges compris, étant globalement plus coûteux que l'équilibre sans échanges (825 milliards de dollars de 1985, contre 765 milliards de dollars de 1985). Ces résultats sont apparemment en contradiction avec l'idée généralement admise que les échanges de droits d'émission permettent dans tous les cas de réduire les coûts totaux des réductions d'émissions.

La présente annexe analyse les conditions dans lesquelles les échanges entraînent une réduction des coûts totaux de la lutte contre les émissions. Elle montre que les échanges réduisent les coûts à condition que la courbe des coûts marginaux à l'échelle mondiale soit concave par rapport à l'origine (par conséquent, sa dérivée seconde doit être positive). Si cette condition n'est pas satisfaite, une situation faisant intervenir un volume d'échanges considérable peut se révéler aussi coûteuse, voire plus, que la situation correspondante sans échanges. En pratique, dans le modèle GREEN, des convexités de la courbe des coûts marginaux mondiaux peuvent apparaître quand les technologies alternatives à long terme deviennent rentables dans certains pays, alors que d'autres pays continuent d'utiliser des sources d'énergie classiques.

Prenons n pays dans un scénario sans échanges. Leurs émissions sont limitées pour ne pas dépasser E_i^{NT} , où $i = 1...n$ respectivement, ce que l'on obtient en portant le prix du carbone à P_i^{NT} dans chaque pays i . En revanche, si les pays sont autorisés à procéder à des échanges de droits d'émission, ils fixent leurs émissions E_i^T au niveau où leur coût marginal de réduction d'émissions est égal au prix d'équilibre commun du carbone P . Les échanges procurent un gain si le coût total de réduction d'émissions avec échanges de droits d'émission est inférieur au coût total sans échanges :

$$[1] \quad P^T \sum_i E_i^T - \sum_i P_i^{NT} \cdot E_i^{NT} < 0 \quad \text{où } i = 1, \dots, n$$

L'expression [1] peut être reformulée en termes de variations des prix du carbone dans les cas avec et sans échanges ($\Delta P_i = P_i^T - P_i^{NT}$) et de variations des niveaux d'émission dans les cas avec et sans échanges ($\Delta E_i = E_i^T - E_i^{NT}$):

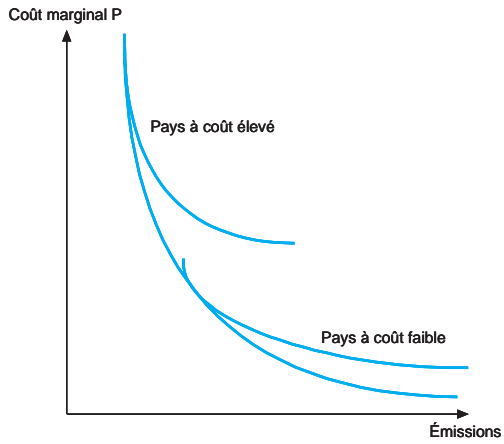
$$[2] \quad \sum_i \Delta P_i \cdot E_i^T + \sum_i P_i^{NT} \cdot \Delta E_i < 0 \quad \text{où } i = 1, \dots, n$$

L'expression [2] peut être appliquée au cas simplifié avec deux pays, dans lequel un pays se caractérise par un coût marginal élevé de réduction d'émissions (pays à coût élevé : HC) et l'autre un coût faible (pays à coût faible : LC). Le tableau ci-après récapitule la décomposition de la variation de coût imputable aux échanges.

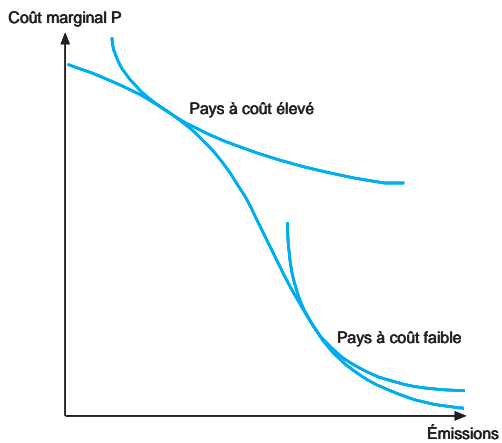
Termes	Incidence des échanges	Signe
[2.1] $\Delta P_{HC} \cdot E_{HC}^T$	Réduction du coût marginal dans le pays à coût élevé.	Négatif
[2.2] $P_{HC}^{NT} \cdot \Delta E_{HC}$	Augmentation des émissions dans le pays à coût élevé (qui correspond à l'acquisition de droits par le pays à coût élevé).	Positif
[2.3] $\Delta P_{LC} \cdot E_{LC}^T$	Hausse du coût marginal dans le pays à coût faible.	Positif
[2.4] $P_{LC}^{NT} \cdot \Delta E_{LC}$	Baisse des émissions dans le pays à coût faible (qui correspond à la vente de droits du pays à coût faible).	Négatif

Le résultat escompté, à savoir une réduction des coûts globaux de la réduction d'émissions grâce aux échanges, est corroboré lorsque les termes [2.1] et [2.4] sont importants (et négatifs). C'est le cas lorsque la pente de la courbe du coût marginal dans le pays à coût élevé est plus forte que dans le pays à coût faible. Comme le montre le graphique A1.1, cela correspond à une situation où la courbe des coûts mondiaux est concave par rapport à l'origine. A contrario, les échanges risquent, en principe, d'alourdir les coûts globaux si la pente de la courbe du coût marginal dans le pays à coût élevé est moins forte que dans le pays à coût faible, comme dans le graphique A1.2 (dans ce cas, les termes [2.2] et [2.3] sont importants et positifs). En l'occurrence, la hausse de coût dans le pays à coût faible est supérieure à la réduction de coût dans le pays à coût élevé et le terme de droite de l'expression [2] devient positif. Dans le modèle GREEN, cela se produit quand les énergies alternatives sont utilisées dans les pays de l'OCDE, alors qu'elles ne sont pas encore concurrentielles dans la CEI (parce qu'il existe des subventions à l'énergie et que la structure de la demande d'énergie est différente). Il se dégage des courbes des coûts marginaux présentées dans les graphiques A1.3 à A1.8 que cette situation peut impliquer que la pente de coût marginal dans la zone de l'OCDE est moins prononcée que dans la CEI.

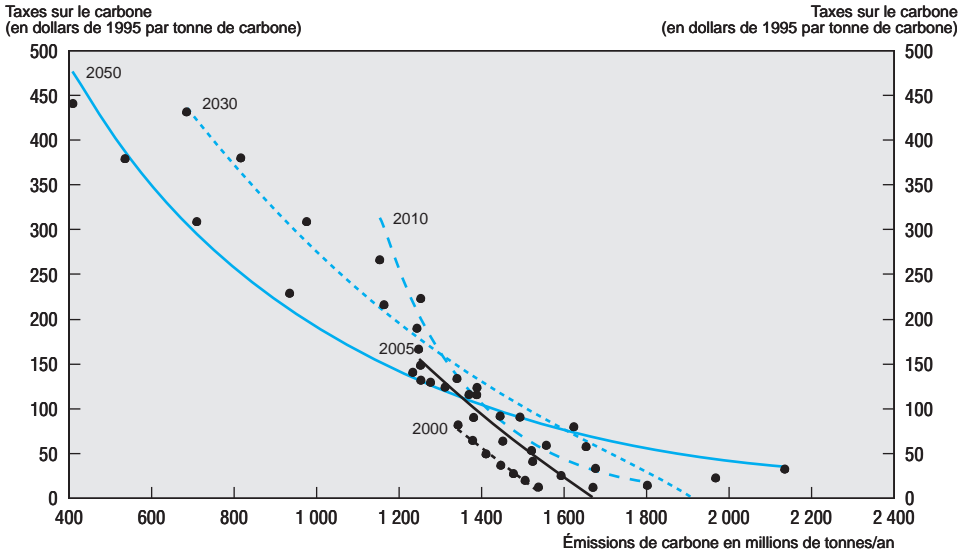
Graphique A1.1. Courbe de coût marginal mondial concave à l'origine



Graphique A1.2. Courbe de coût marginal mondial convexe à l'origine

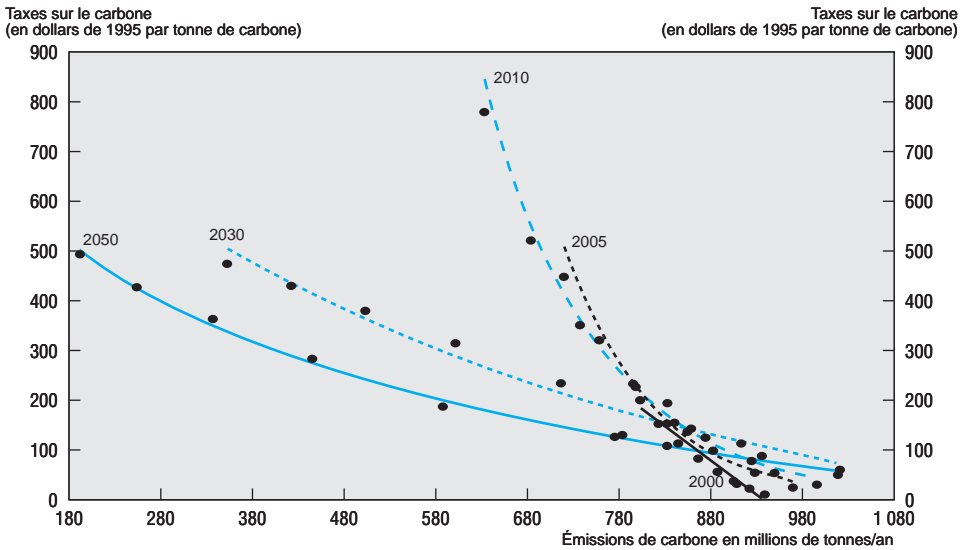


Graphique A1.3. Courbes de coût pour les États-Unis



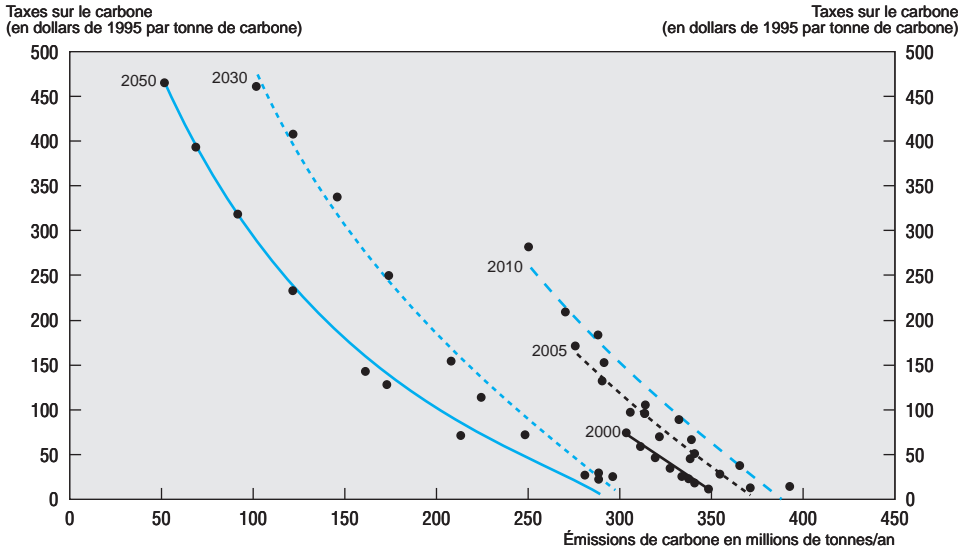
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique A1.4. Courbes de coût pour l'Union européenne



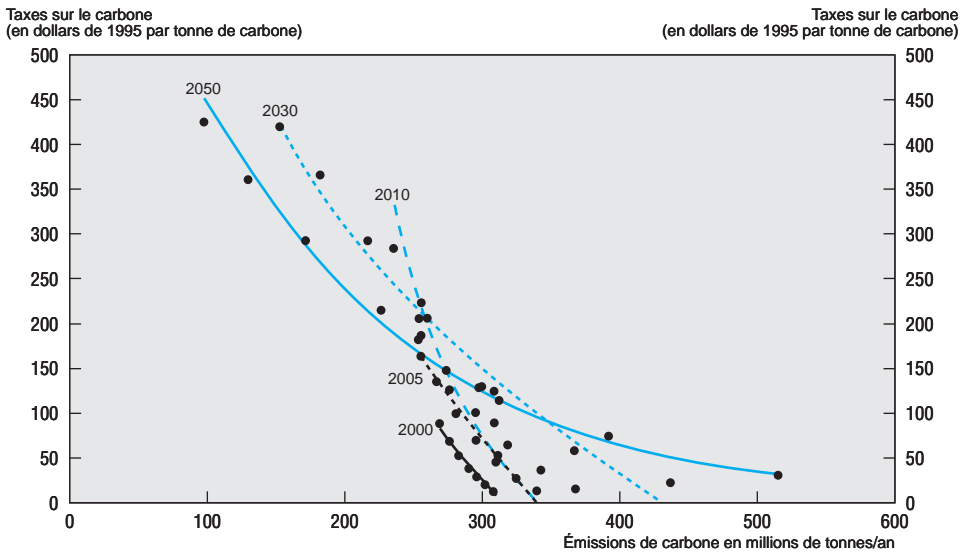
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique A1.5. Courbes de coût pour le Japon



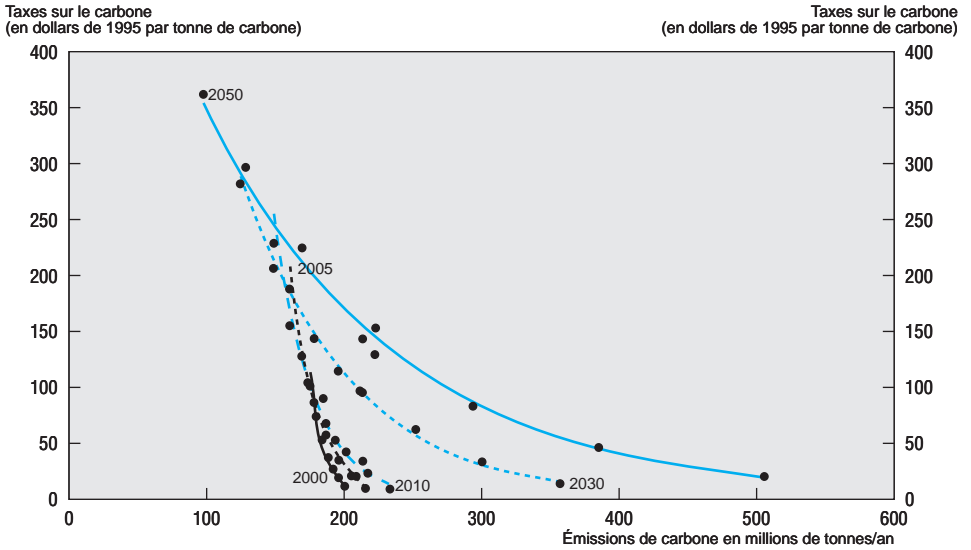
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique A1.6. Courbes de coût pour les autres pays OCDE



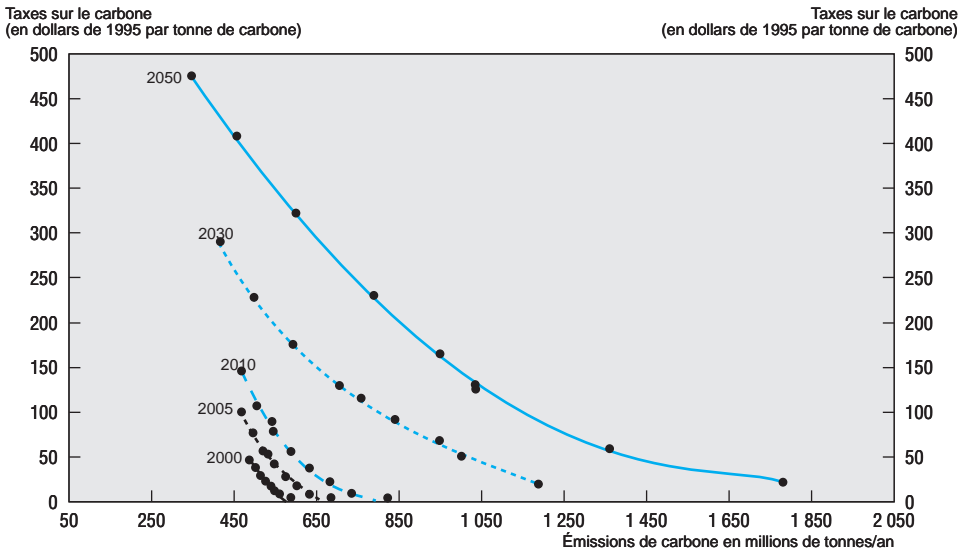
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique A1.7. Courbes de coût pour l'Europe orientale



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique A1.8. Courbes de coût pour la CEI



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Conversion des émissions passées de CO₂ en concentration future

Pour évaluer l'influence des politiques de réduction des émissions sur la concentration atmosphérique, on recourt habituellement à des « fonctions de réponse » de forme réduite. Ces fonctions décrivent comment une variation des émissions à un moment donné modifie le profil temporel futur d'évolution de la concentration par rapport à un niveau de référence. Ce niveau de référence lui-même est obtenu à partir de modèles complexes incorporant de façon exhaustive les divers éléments du cycle du carbone. La définition d'une concentration de référence et l'analyse de l'influence des politiques se heurtent à de nombreuses incertitudes. Tout d'abord, de nombreux aspects du cycle du carbone sont mal connus, notamment l'effet de fertilisation¹. Ensuite, un élément plus important encore est que l'on ne sait pas comment se comporterait ce cycle à des niveaux de concentration très supérieurs à ceux observés par le passé. Enfin, la dynamique du cycle du carbone s'étend sur le très long terme (plusieurs centaines d'années) et oblige à établir des prévisions de croissance économique à un horizon beaucoup trop lointain pour que l'on puisse imaginer les solutions technologiques qui pourraient être mises en œuvre d'ici là. Par conséquent, l'analyse ci-après n'a guère de valeur prédictive ; elle entend seulement mettre en évidence la dynamique en jeu.

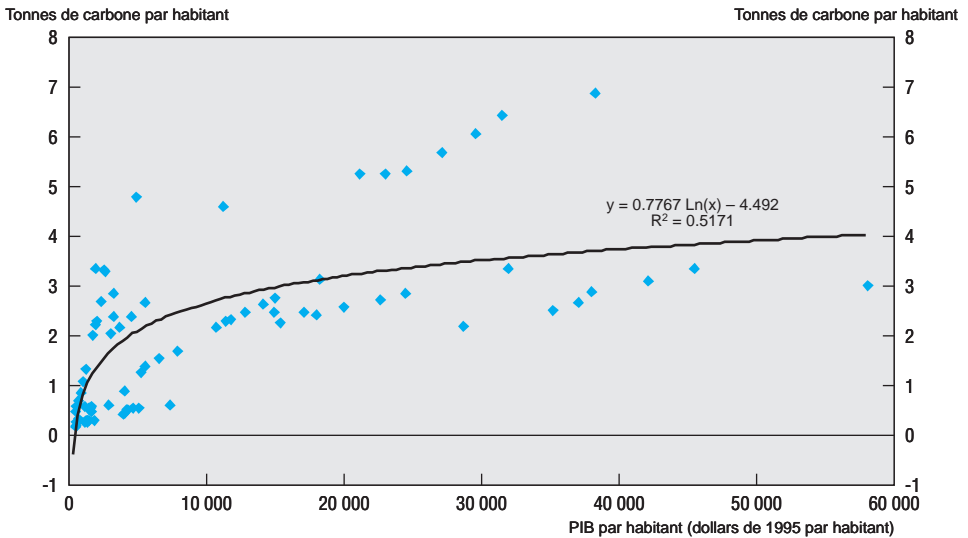
1. La projection de référence pour les émissions

Cette analyse a pour but de quantifier l'impact du Protocole de Kyoto et des politiques alternatives sur la concentration sur une période de 200 ans. Elle concerne les émissions nettes de CO₂ imputables à la combustion de combustibles et aux changements d'affectation des sols. Elle repose sur un profil d'évolution temporelle des émissions jusqu'en 2050, calculé à l'aide du modèle GREEN. Ce profil temporel est prolongé pour couvrir la période allant de 2050 à 2200 sur base des hypothèses simplificatrices suivantes :

- La population des pays de l'Annexe 1 reste stable après 2050 tandis que, pour les pays hors Annexe 1, les projections démographiques sont des extrapolations linéaires des tendances prévues pour la période 2030-2050. Ainsi, la population mondiale croît, en moyenne, de 0.8 pour cent par an entre 2010 et 2050, puis de 0.4 pour cent ultérieurement.
- Le PIB par habitant prévu pour les pays hors Annexe 1 est fondé sur l'hypothèse d'un rattrapage partiel des niveaux de productivité. Selon ce postulat, le rapport du PIB moyen par habitant des pays hors Annexe 1 à celui des pays de l'Annexe 1 avoisine 50 pour cent en 2200 (contre 6 pour cent en 1990). Dans le même temps, le PIB par habitant des pays de l'Annexe 1 converge vers un niveau moyen projeté par extrapolation *linéaire* de la tendance caractérisant la période 2030-50.

- Les projections des émissions par habitant sont calculées sur la base d'une relation log-linéaire entre les émissions par habitant et le PIB par habitant estimée à partir des données du scénario de référence du modèle GREEN pour la période comprise entre 1995 et 2050. Comme le montre le graphique A2.1, ce rapport implique que les émissions augmentent au fur et à mesure que les pays s'enrichissent, mais à un rythme moins rapide que ne le fait le PIB par habitant. On suppose que les émissions par habitant convergent vers les valeurs projetées en appliquant le rapport log-linéaire à l'horizon 2200².

Graphique A2.1. Relation entre les émissions par habitant et le PIB par habitant dans le scénario de référence du modèle GREEN



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

D'après ces hypothèses, les émissions mondiales devraient augmenter de 0.7 pour cent par an pendant la période comprise entre 2050 et 2200 (contre une croissance de 2.4 pour cent par an entre 2010 et 2050, selon la prévision établie avec le modèle GREEN). Les émissions des pays de l'Annexe I devraient atteindre leur plus haut niveau – 8 gigatonnes par an – en 2050, pour diminuer légèrement par la suite (de 0.2 pour cent par an). La croissance des émissions de CO₂ à très long terme serait donc intégralement imputable aux pays hors Annexe I (principalement aux pays ou régions correspondant aux catégories suivantes du modèle GREEN : exportateurs d'énergie, Inde et reste du monde). Il s'ensuit que les émissions des pays de l'Annexe I auront relativement peu de poids, en regard des émissions mondiales, à l'horizon 2200.

2. Modélisation du cycle du carbone

2.1. La forme réduite du cycle du carbone

La modélisation du cycle du carbone est une tâche complexe, car il faut représenter un très grand nombre d'interactions physiques entre les océans, la biosphère et l'atmosphère. De ce fait, les modèles du cycle du carbone sont généralement très lourds à manier dans la pratique. Aux fins de l'analyse économique, il est préférable d'utiliser une formulation réduite – appelée aussi « fonction de réponse » – au lieu des modèles d'origine, où toutes les données sont précisées.

Les fonctions de réponse utilisées ici sont établies à partir d'une étude comparative entreprise dans le cadre de l'évaluation scientifique réalisée pour le Groupe de travail I du GIEC (voir Enting *et al.*, 1994). La comparaison porte sur 18 modèles plus ou moins complexes, allant de fonctions de réponse simples à des modèles complets de circulation générale. Une fonction de réponse est calculée en ajoutant 10 Gt de carbone au profil de concentration de référence et en laissant le modèle calculer la proportion de ce carbone supplémentaire qui reste dans l'atmosphère après un laps de temps déterminé. Sur les six modèles complets examinés dans le cadre du projet de comparaison du GIEC, trois contiennent assez d'informations pour calculer les fonctions de réponse. Les calculs des concentrations présentés dans cette annexe sont fondés sur ces trois modèles :

- Le modèle mis au point par Wigley (1993) (appelé Modèle W) combine les fonctions de réponse des océans dérivées de modèles mécanistes des océans et des modèles paramétrés des systèmes terrestres.
- Le modèle mis au point par Siegenthaler et Joos (1992) à l'Université de Berne (appelé Modèle J) comporte des composantes océaniques et terrestres complètement paramétrés.
- Le modèle mis au point par Wuebbles et Jain (Jain *et al.*, 1995) au Lawrence Livermore National Laboratory (appelé Modèle L) est un autre modèle totalement paramétré, mais dans lequel les composantes terrestres sont plus détaillées.

La fonction de réponse établie sur la base de ces trois modèles est linéaire et exprime la quantité de CO₂ qui reste dans l'atmosphère en proportion de la quantité de CO₂ émise les années antérieures. Des formes réduites du modèle de Wigley ont déjà été utilisées dans des publications économiques traitant du profil optimal de réduction des émissions (voir par exemple Ha-Duong *et al.*, 1997). Dans ce qui suit, on vérifie la solidité des résultats obtenus avec ce modèle en utilisant les deux autres. En outre, les fonctions de réponse sont également tributaires du niveau de la concentration de référence, dès lors qu'une concentration plus forte réduit la capacité d'absorption du CO₂ inhérente au cycle du carbone.

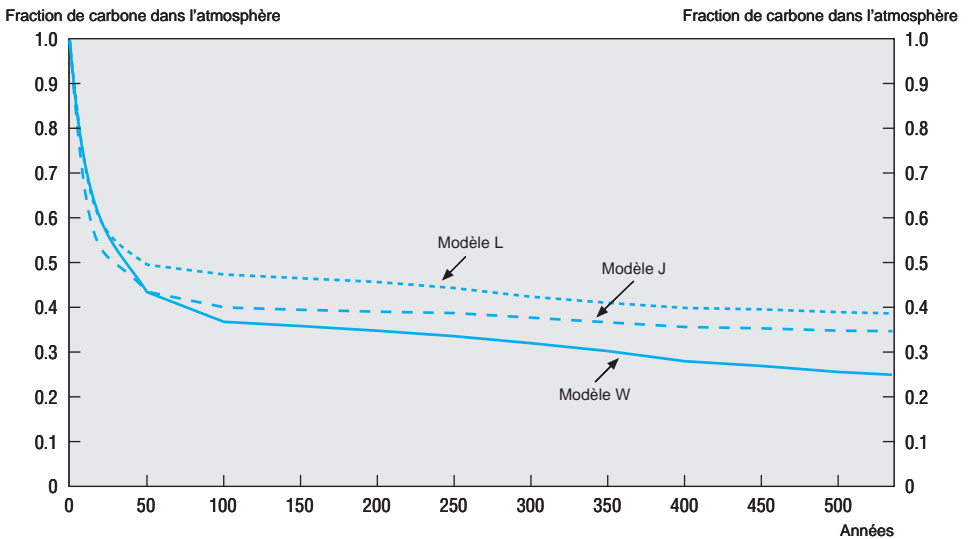
La formulation de la fonction de réponse est relativement simple (voir équation [1]). Elle exprime la concentration atmosphérique au moment t (C_t) en fonction de la somme pondérée des émissions passées (E_u). Le coefficient de pondération – R_{t-u} – caractérise la fonction de réponse ; il correspond au pourcentage de CO₂ émis à la période u qui se trouve encore dans l'atmosphère à la période t , c'est-à-dire $t-u$ années après avoir été émis (c'est la fraction de carbone résiduel). En principe, sa valeur est égale à l'unité pour les émissions de l'année précédente et diminue de façon plus ou moins exponentielle pour celles des années antérieures. L'équation peut être formulée comme suit :

$$[1] \quad C_t = C_{t_0} + 0.471 \sum_{u=t_0}^{t-1} R_{t-u} \cdot E_u$$

où t_0 est l'année de référence à partir de laquelle les concentrations sont calculées (concrètement, 1765, année prise comme repère pour définir le niveau de concentration à l'ère pré-industrielle). On convertit les gigatonnes de CO_2 en ppmv en appliquant le coefficient 0.471. Le terme C_{t_0} (concentration à l'ère pré-industrielle) de l'équation [1] est calibré de manière à reproduire le niveau de concentration observé en 1990 (354 ppmv).

Dans les fonctions de réponse dérivées des trois modèles retenus, les valeurs de la fraction de carbone résiduel (R_{t-w}) sont différentes. Le graphique A2.2 schématise les valeurs de ces fractions de carbone restant dans l'atmosphère sur une période de 500 ans, en adoptant une concentration atmosphérique de carbone de 650 ppmv³ comme référence. Les trois fonctions impliquent un rythme relativement rapide de disparition du carbone de l'atmosphère pendant les 50 premières années. Par la suite, la proportion de carbone restant dans l'atmosphère tend à se stabiliser. Avec le modèle de Wigley, le taux de disparition est supérieur à plus long terme et la fraction de carbone résiduel est ramenée à 25 pour cent après 500 ans. Le résultat des deux autres modèles est plus pessimiste : même après une période de plus de 500 ans, environ 40 pour cent du carbone rejeté de nos jours se trouveraient encore dans l'atmosphère.

Graphique A2.2. Trois fonctions de réponse différentes

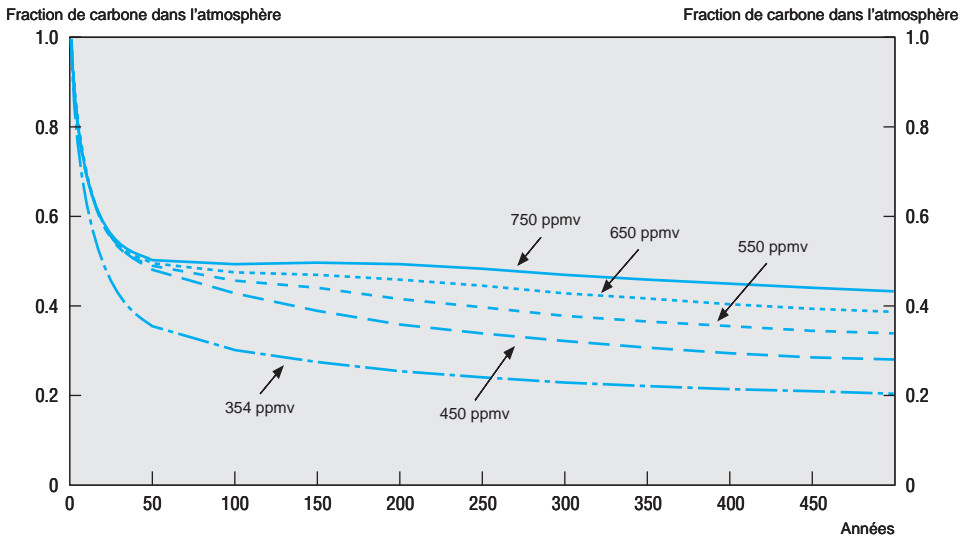


Source : Estimations à partir de Enting *et al.* (1994).

2.2. Influence du niveau de concentration de référence

Le niveau de référence retenu pour la concentration de carbone influe sur la fonction de réponse, peut-être même plus encore que le choix du modèle. Des simulations exécutées avec le Modèle L en témoignent. Le graphique A2.3 présente les différentes fonctions de

Graphique A2.3. Fonctions de réponse pour différents niveaux de concentration ambiante



Source : Estimations à partir de Enting *et al.* (1994).

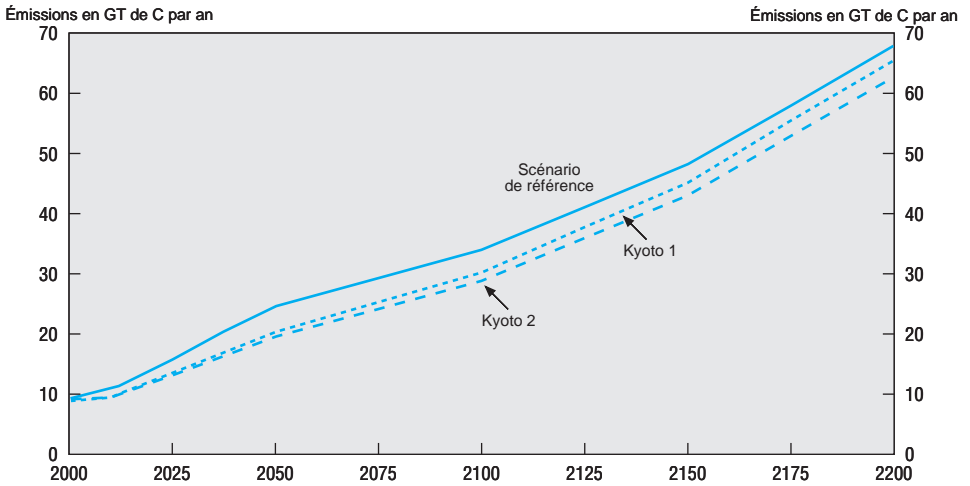
réponse qui correspondent à des concentrations de référence allant de 354 ppmv (niveau de 1990) à 750 ppmv. A long terme, la fraction de carbone résiduel diffère nettement selon la concentration de référence : elle varie entre 20 pour cent pour une concentration de référence de 354 ppmv et plus de 40 pour cent si la concentration de référence est de 750 ppmv. On voit donc qu'une concentration de référence plus élevée réduit la capacité d'absorption du CO₂ inhérente au cycle du carbone. En conséquence, une stabilisation de la concentration à un niveau plus élevé obligera à prendre des mesures plus sévères de réduction des émissions compte tenu du fait que le taux d'absorption naturelle du carbone est moindre.

3. Incidence du Protocole de Kyoto

Le graphique A2.4 illustre l'évolution des émissions mondiales de CO₂, en partant de l'hypothèse selon laquelle les pays de l'Annexe 1 rempliront leurs obligations au cours de la première période d'engagement (2008-12) du Protocole de Kyoto et qu'ils maintiendront leurs émissions constantes aux niveaux ainsi atteints entre 2010 et 2200 (scénario appelé Kyoto I dans le graphique A2.4). Ce profil temporel est mis en regard du scénario de référence, tel que défini plus haut. Le Protocole de Kyoto devrait donc produire un effet très faible sur les émissions mondiales, qui va même en s'atténuant après 2100, ce qui concorde avec l'importance décroissante des pays de l'Annexe 1 dans les émissions mondiales.

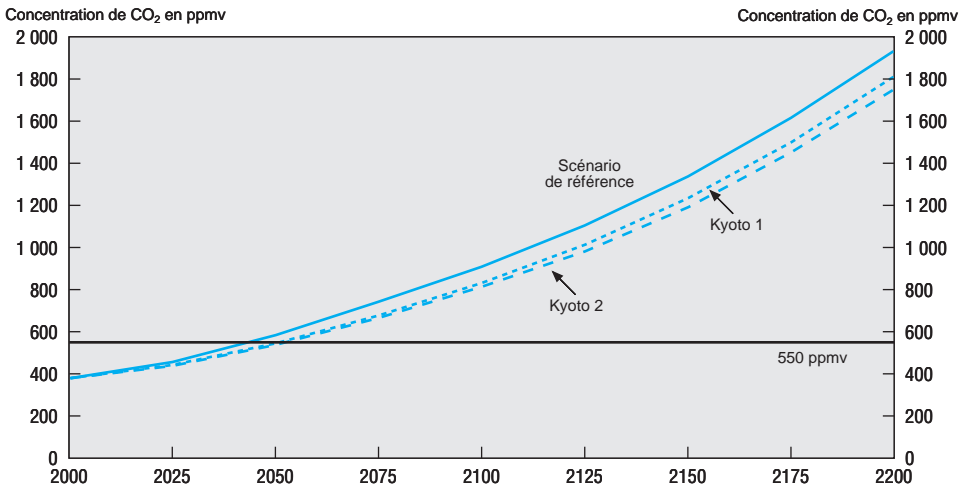
Le graphique A2.5 montre comment ces profils temporels des émissions se traduisent en concentrations (à l'aide du modèle de Wigley, avec une concentration de référence de 650 ppmv). Dans le scénario de référence, le seuil de 550 ppmv, correspondant au

Graphique A2.4. Impact à long terme du Protocole de Kyoto sur les émissions de CO₂ selon les prévisions du modèle GREEN



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique A2.5. Impact à long terme du Protocole de Kyoto sur les concentrations de CO₂¹ selon les prévisions du modèle GREEN



1. En utilisant le modèle de Wigley (modèle W).
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

doublément de la concentration pré-industrielle, serait dépassé au milieu du siècle prochain. Selon la fonction de réponse simple utilisée, la concentration pourrait alors augmenter pour atteindre presque 2000 ppmv à la fin du XXII^e siècle. Le Protocole de Kyoto n'aura guère d'influence sur cette évolution. Au mieux, il devrait permettre de reporter d'une décennie l'échéance à laquelle le niveau de 550 ppmv sera atteint. Le graphique A2.5 présente aussi un scénario dans lequel les pays de l'Annexe 1 continuent à réduire leurs émissions après la première période d'engagement, au même rythme linéaire qu'au cours de la période 1990-2010 (c'est le scénario appelé Kyoto 2 dans les graphiques A2.4 et A2.5). Il implique des réductions très importantes – et probablement irréalistes – dans les pays de l'Annexe 1 après la première période d'engagement, aboutissant en 2200 à un niveau des émissions équivalent à un quart des niveaux de 1990. Il est frappant de constater que cet effort n'a presque pas d'incidence sur les émissions mondiales ni sur la concentration. La part revenant aux pays de l'Annexe 1 dans les émissions mondiales se réduit tellement à long terme que tout effort de réduction supplémentaire de la part de ces pays n'a plus aucune influence sur les niveaux des émissions mondiales et de la concentration.

Le tableau A2.1 rapporte des résultats de simulations visant à tester la solidité des résultats susmentionnés en ce qui concerne le choix du modèle du cycle du carbone. Y sont indiquées les réductions en pourcentage des concentrations de CO₂ dans les deux scénarios du Protocole de Kyoto calculées au moyen des fonctions de réponse dérivées des trois modèles du cycle du carbone décrits plus haut. Les trois modèles prédisent des réductions de la concentration de CO₂ se situant autour de 10 pour cent.

Tableau A2.1. **Réduction de la concentration induite par le Protocole de Kyoto :**
Comparaison des différents modèles du cycle du carbone
Pourcentages

	Kyoto 1		Kyoto 2	
	2100	2200	2100	2200
Modèle W	-11.0	-7.9	-13.3	-11.0
Modèle J	-10.7	-8.1	-13.0	-11.2
Modèle L	-11.1	-8.4	-13.4	-11.5

Kyoto 1 : Les pays de l'Annexe 1 remplissent leurs obligations pour la première période d'engagement (2008-12) du Protocole de Kyoto, puis maintiennent leurs émissions constantes aux niveaux ainsi atteints jusqu'en 2200.

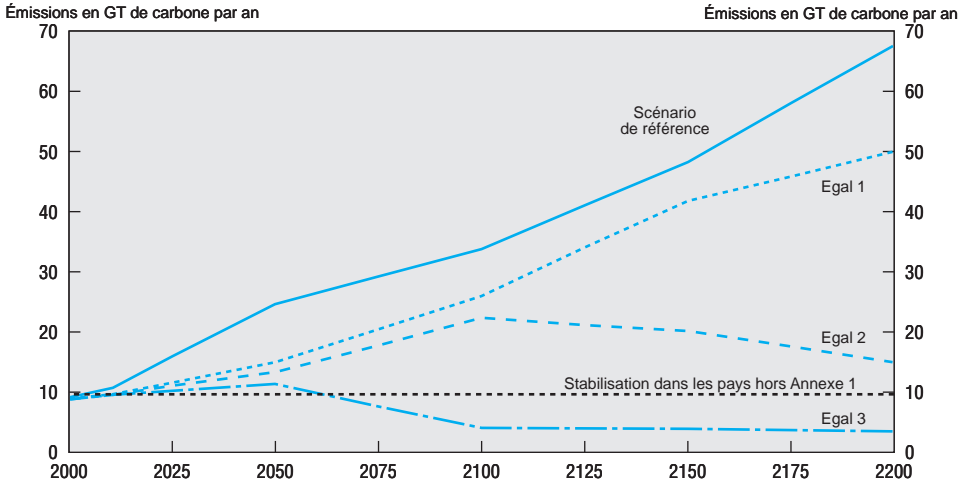
Kyoto 2 : Les pays de l'Annexe 1 continuent à réduire leurs émissions après la première période d'engagement au même rythme linéaire qu'au cours de la période 1990-2010.

Source : Fondé sur Enting *et al.*, 1994.

4. Scénarios de stabilisation

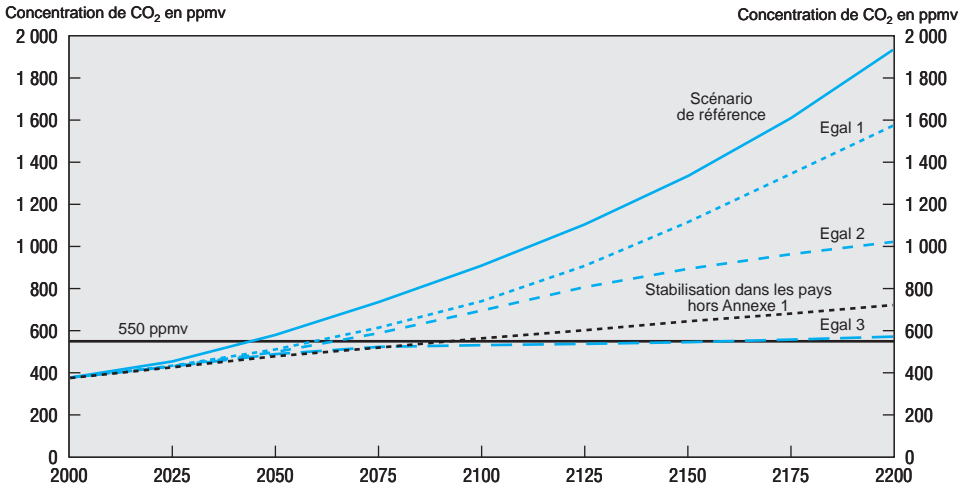
Les graphiques A.2.6 et A.2.7 présentent les résultats d'un scénario dans lequel, après la première période d'engagement du Protocole à la fois, les pays de l'Annexe 1 et ceux hors Annexe 1 maintiennent leurs émissions de CO₂ à des niveaux constants correspondant à ceux de 2010 (scénario appelé stabilisation dans les pays hors Annexe 1). L'impact sur la concentration (calculé en utilisant le modèle de Wigley, compte tenu d'une concentration de référence de 650 ppmv) est notable : le seuil de 550 ppmv serait dépassé un demi siècle plus tard. Cependant, comme le montre le graphique A2.7, la concentration serait encore en hausse à ce moment-là et atteindrait 720 ppmv en 2200. En outre, ce scénario n'est sans doute pas

Graphique A2.6. Différentes stratégies de réduction des émissions avec participation des pays hors Annexe 1



Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

Graphique A2.7. Impact à long terme sur la concentration de CO₂ des réductions d'émission avec participation des pays hors Annexe 1¹



1. En utilisant le modèle de Wigley (modèle W).
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

politiquement viable, étant donné qu'en 2010, les émissions par habitant des pays hors Annexe 1 devraient être très inférieures à celles des pays de l'Annexe 1 (en moyenne, 0,7 tonne de CO₂ par an et par habitant dans les pays hors Annexe 1, contre 3,6 tonnes dans les pays de l'Annexe 1). Les négociations passées et en cours concernant le changement climatique donnent à penser qu'un accord qui n'obéirait pas à une certaine logique égalitaire, a peu de chances d'emporter l'adhésion d'un grand nombre de pays en développement.

On peut citer un exemple précis de répartition égalitaire des droits d'émission : c'est le cas de figure où les pays hors Annexe 1 imposent une limitation des émissions seulement lorsque leurs émissions par habitant atteignent le même niveau que celles des pays de l'Annexe 1. Cette hypothèse a pour effet que le rythme auquel les pays de l'Annexe 1 réduisent leurs propres émissions détermine l'effort de réduction fourni par les pays hors Annexe 1. Des réductions plus rapides et plus sévères des émissions dans les pays de l'Annexe 1 devraient limiter d'autant les possibilités des pays hors Annexe 1 d'accroître leurs propres émissions.

L'impact du Protocole de Kyoto compte tenu de cette formule de répartition, c'est-à-dire dans l'hypothèse où les pays hors Annexe 1 ne dépassent pas les émissions par habitant des pays de l'Annexe 1 et ces derniers maintiennent leurs émissions constantes aux niveaux spécifiés dans le Protocole, est représenté dans les graphiques A2.6 et A2.7 (scénario Égal 1). Dans ce cas, le Protocole de Kyoto contribue beaucoup plus à la réduction des émissions et de la concentration que dans celui où les pays hors Annexe 1 ne sont tenus par aucune obligation. Néanmoins, ce scénario n'aboutit pas à une stabilisation, sous quelque forme que ce soit. La différence est encore plus grande si l'on postule le même type d'action conditionnelle de pays hors Annexe 1 dans le cas où les pays de l'Annexe 1 se donnent pour objectif de faire baisser leurs émissions après la première période d'engagement. Selon ce scénario (scénario Égal 2 dans les graphiques A2.6 et A2.7), les pays hors Annexe 1 commencent à réduire leur propres émissions en 2100 et la concentration serait presque stabilisée à quelque 1000 ppmv en 2200.

Le graphique A2.6 illustre aussi un scénario dans lequel la concentration de CO₂ est stabilisée à 550 ppmv (Égal 3). Dans ce cas, les pays de l'Annexe 1 fixent un objectif pour leurs propres émissions en 2100 égal à 40 pour cent de la moyenne des émissions par habitant des pays hors Annexe 1 en 1990. Cela suppose des réductions draconiennes : en 2050, les émissions des pays de l'Annexe 1 ne devraient pas dépasser la moitié de leur niveau de 1990. Les pays hors Annexe 1 sont censés imposer des restrictions dès que leurs émissions par habitant deviennent supérieures à la moyenne de celles des pays de l'Annexe 1. En conséquence, ils engagent un effort de réduction considérable à partir de 2010 et, en 2050, leurs émissions devraient être réduites de moitié, par rapport à leur niveau dans le scénario de référence.

Ce dernier scénario confirme que toute stratégie visant à stabiliser la concentration de CO₂ à un niveau inférieur à 550 ppmv obligerait à ramener les émissions mondiales très en-dessous de leur niveau actuel (dans le scénario égalité 3, les émissions baissent jusqu'à 4 gigatonnes en 2100, contre 8 gigatonnes en 1990). Bien entendu, il est impossible d'y parvenir sans la participation des pays hors Annexe 1.

5. Stabilisation à long terme ou maximums locaux

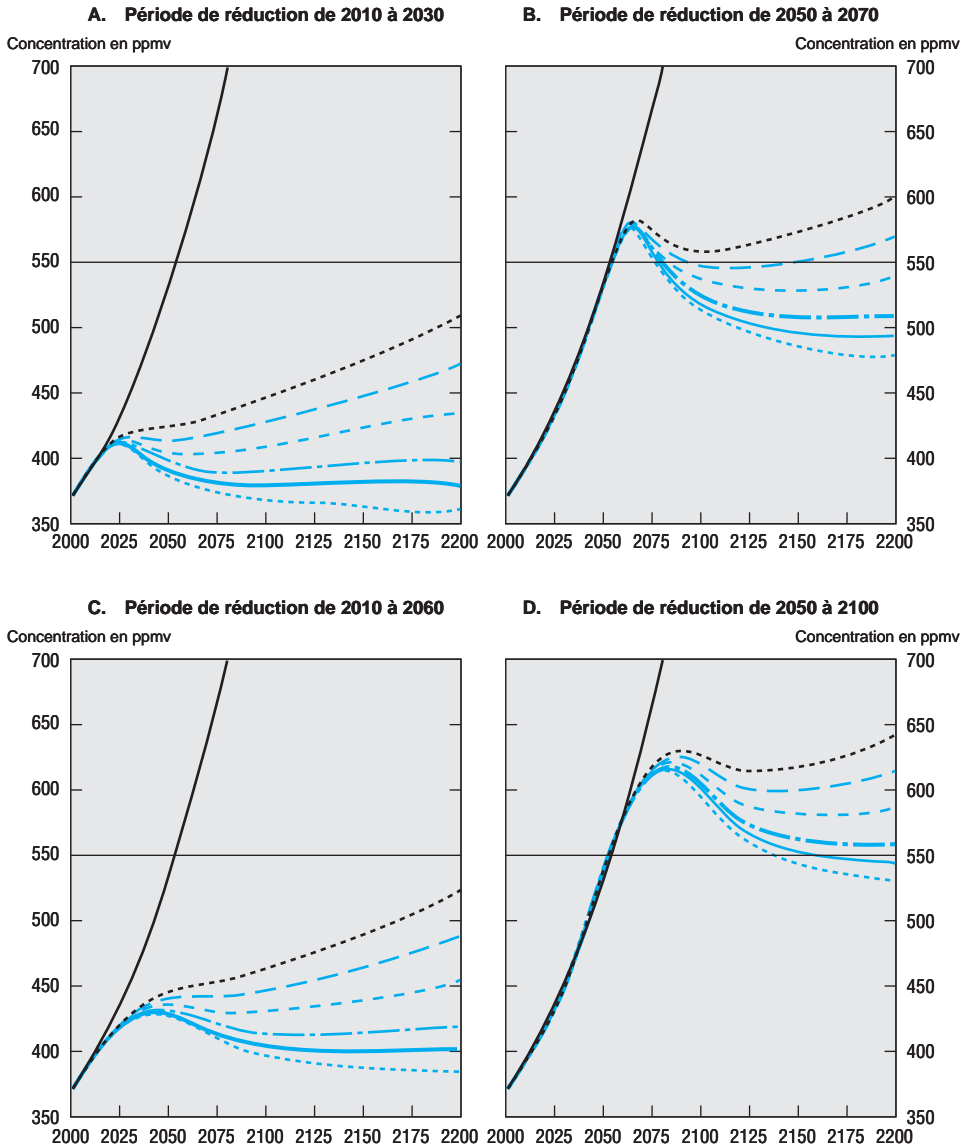
N'importe quel objectif de stabilisation des émissions peut être atteint par une multitude de profils temporels différents. L'analyse présentée au chapitre 3 fait ressortir que l'on a le choix, d'une manière schématique, entre deux stratégies : prendre des mesures dès un stade précoce afin d'échelonner l'effort d'ajustement sur une plus longue période, ou bien remettre l'ajustement à plus tard dans l'espoir que son coût économique sera moindre. Les

graphiques A2.8a à A2.8d entendent mettre en relief les propriétés à long terme de la dynamique du cycle du carbone. Les profils temporels d'évolution de la concentration qui y sont représentés (calculés à l'aide du Modèle W, compte tenu d'une concentration de référence de 650 ppmv) correspondent à des réductions jusqu'à des niveaux minimums d'émissions à des horizons temporels différents. Par exemple, dans le graphique A2.8a, toutes les trajectoires se rapportent à des réductions des émissions étalées sur la période comprise entre 2010 et 2030, les émissions demeurant constantes par la suite. Plus précisément, la trajectoire 4 GT correspond à une réduction des émissions mondiales pour atteindre 4 gigatonnes de carbone par an (contre 8 gigatonnes en 1995) alors que le profil temporel 0 GT simule l'élimination complète de toutes les émissions de CO₂ au cours de la même période. Ces diagrammes permettent de tirer un certain nombre de conclusions :

- Quelques trajectoires seulement aboutissent à une stabilisation réelle à long terme de la concentration de CO₂. Elles sont indiquées en caractères gras dans les graphiques A2.8a à A2.8d et traduisent une situation d'équilibre où les émissions sont égales à la quantité de carbone absorbé chaque année. Le niveau des émissions correspondant à cette situation d'équilibre est très faible : il représente 0.5 gigatonne de carbone par an si la stabilisation commence en 2010 (graphiques A2.8a et A2.8c) et environ 1 gigatonne de carbone par an si la stabilisation débute en 2050 (graphiques A2.8b et A2.8d). On voit donc que, pour parvenir à stabiliser effectivement la concentration de CO₂, il faut ramener les émissions à des niveaux très faibles en comparaison de ceux que l'on observe actuellement.
- Les trajectoires dans lesquelles les minimums d'émissions à long terme dépassent ces niveaux d'équilibre ne conduisent pas une stabilisation en ce sens que les concentrations continuent à augmenter dans le long terme. Cependant, certaines affichent un maximum local après lequel les concentrations diminuent temporairement, puis recommencent à croître (par exemple 4 GT dans le graphique A2.8b). Les réductions des émissions correspondant à ces trajectoires ne font, au mieux, que remettre à plus tard la hausse des concentrations, au lieu de les stabiliser.
- Le report des réductions provoque l'augmentation du niveau d'équilibre de la concentration (autrement dit, celui auquel la concentration cesse de croître). La concentration pourrait se stabiliser à 380 ppmv si les premières réductions intervenaient en 2010 (0.5 GT dans le graphique A2.8a) tandis que le niveau correspondant serait de 513 ppmv si aucune réduction n'était réalisée avant 2050 (1 GT dans le graphique A2.8b).
- L'étalement des réductions sur une longue période fait augmenter le niveau d'équilibre de la concentration ainsi que les maximums locaux des trajectoires, d'où un risque plus grand de détérioration irréversible du climat (comparer, par exemple, 1 GT dans le graphique A2.8d et 1 GT dans le graphique A2.8b).
- Les pays hors Annexe 1 peuvent, en effet, attendre 2050 pour imposer d'éventuelles réductions (comme dans les graphiques A2.8b et A2.8d) si les émissions mondiales peuvent être ramenées à moins de 1 gigatonne par an sur une période plus ou moins longue. Wigley *et al.* (1996) avancent une conclusion similaire.
- Une stratégie prévoyant des réductions précoces mais relativement faibles qui stabiliserait les émissions au-dessus des niveaux d'équilibre à long terme risque de se révéler moins efficace pour stabiliser le climat qu'une stratégie de réductions reportées mais véritablement draconiennes. On le constate en comparant la trajectoire de stabilisation des émissions à 4 Gt pendant la période 2010-2030 (graphique A2.8a) à celle où les émissions se stabilisent à 1 Gt au cours de la période 2050-2070. La première de ces deux trajectoires maintient la concentration à des niveaux inférieurs, en moyenne, au

Graphique A2.8. Différents profils de stabilisation des concentration de CO₂¹

— Maintien des objectifs de Kyoto - - - - 0 GT — 0.5 GT — 1 GT - - - - 2 GT — 3 GT - - - - 4 GT



1. En utilisant le modèle de Wigley (modèle W).
Source : Modèle GREEN, Secrétariat de l'OCDE.

cours de la période considérée, mais avec toutefois une tendance à la hausse. Cette stratégie est probablement plus coûteuse, mais la seconde est plus risquée dès lors que la concentration se rapproche beaucoup plus rapidement du seuil de 550 ppmv.

Pour parvenir à une stabilisation à l'équilibre, il est impératif que les émissions annuelles ne dépassent pas le taux d'absorption naturel du carbone. Le tableau A2.2 indique les niveaux des émissions pour une stabilisation à l'équilibre, calculés à l'aide des trois modèles dans l'hypothèse d'une concentration de référence de 650 ppmv. Avec les trois modèles, les niveaux d'équilibre des émissions sont très faibles (moins de 1 Gt) et plus ou moins équivalents. Ceux que l'on obtient avec les Modèles J et L sont inférieurs à celui du Modèle W, résultat vraisemblable compte tenu des valeurs plus élevées, dans ces deux modèles, de la fraction de carbone résiduel à long terme (graphique A2.2).

Tableau A2.2. Niveaux d'équilibre des émissions correspondant à la stabilisation de la concentration : comparaison des différents modèles du cycle du carbone

	Périodes visées pour les réductions des émissions			
	2010-2030	2010-2060	2050-2070	2050-2100
Modèle J (650 ppmv) ¹	0.2 (383) ²	0.3 (409)	0.4 (518)	0.4 (575)
Modèle L (650 ppmv) ¹	0.3 (397)	0.4 (431)	0.6 (559)	0.7 (628)
Modèle W (650 ppmv) ¹	0.4 (372)	0.5 (399)	0.8 (500)	1.0 (555)
Modèle L (450 ppmv) ¹	0.7 (386)	0.9 (417)	1.8 (544)	2.3 (612)

1. Les chiffres entre parenthèses sont les niveaux de référence de la concentration.

2. Les chiffres entre parenthèses sont les niveaux correspondants auxquels la concentration se stabilise.

Le tableau A2.2 indique également les niveaux d'équilibre des émissions si la concentration de référence est de 450 ppmv (avec le Modèle L) ; ils sont plus élevés que dans les fonctions de réponse partant de 650 ppmv, car la fraction de carbone résiduel est plus faible lorsque la concentration de référence est inférieure (voir graphique A2.3). Ainsi, en prenant des mesures à brève échéance (à partir de 2010), la concentration de référence reste inférieure et les émissions peuvent se stabiliser à un niveau d'équilibre plus élevé (environ 1 Gt par an). En revanche, une action engagée avec retard donnerait lieu à une augmentation plus forte de la concentration, et il faudrait alors ramener les émissions à un niveau quelque peu inférieur (0.6-0.7 Gt par an).

Notes

1. Une étude récente de Cao et Woodward (1998) laisse entendre que l'effet de fertilisation pourrait se neutraliser à une concentration de CO₂ de 450 ppmv. Si cela se confirme, l'effet de fertilisation serait presque nul dans les fourchettes de concentrations retenues dans les scénarios exposés ci-après.
2. Pour certains pays de l'Annexe I (par exemple les États-Unis et la CEI), cela suppose une baisse à long terme des émissions par habitant.
3. Étant donné que, selon les prévisions, la concentration de carbone est appelée à passer de son niveau actuel de 370 ppmv à environ 900 ppmv à la fin du siècle prochain, il se justifie d'utiliser une valeur moyenne de 650 ppmv en guise de concentration de référence.

Définition des règles de partage de la charge

Cette annexe décrit les trois règles de partage de la charge utilisées dans la section 4.

1. Règle de la «capacité à payer»

Émissions des pays de l'Annexe 1 à l'échéance t :

$$\text{Si } r \in \text{Annexe 1} \quad \bar{E}_{r,t} = (1 - \gamma) \cdot E_{r,t0} < E_{r,t}$$

où γ est un taux donné de réduction ; $E_{r,t}$ et $E_{r,t0}$ représentent les émissions aux échéances t et $t0$ en l'absence de mesures de limitation ; $\bar{E}_{r,t}$ correspond aux émissions à l'échéance t compte tenu des mesures de limitation.

Émissions des pays hors Annexe 1 à l'échéance t :

$$\text{Si } r \in \text{hors Annexe 1 et} \quad \left(\frac{PIB_{r,t}}{POP_{r,t}} \right) \geq \alpha \left(\frac{PIB_{\text{Annexe 1},t}}{POP_{\text{Annexe 1},t}} \right)$$

$$\text{alors,} \quad \bar{E}_{r,t} = E_{r,t0} \cdot \left(1 + \gamma_{r,t}^{\text{Référence}} - \varepsilon \left(\frac{PIB_{r,t} / POP_{r,t}}{PIB_{\text{hors Annexe 1}} / POP_{\text{hors Annexe 1},t}} \right) \right)$$

où $PIB_{r,t}$, $PIB_{\text{Annexe 1},t}$ et $PIB_{\text{hors Annexe 1},t}$ sont respectivement le PIB du pays r hors Annexe 1, celui de l'ensemble des pays de l'Annexe 1 et celui de l'ensemble des pays hors Annexe 1 ; $POP_{r,t}$, $POP_{\text{Annexe 1},t}$ et $POP_{\text{hors Annexe 1},t}$ sont respectivement la population du pays r hors Annexe 1, celle de l'ensemble des pays de l'Annexe 1 et celle de l'ensemble des pays hors Annexe 1 ; $\gamma_{r,t}^{\text{Référence}}$ représente le taux de croissance des émissions dans le scénario de référence ; et enfin, α et ε sont les paramètres calibrés.

2. Règle de l'«égalité des émissions par habitant»

Émissions des pays de l'Annexe 1 à l'échéance t :

$$\text{Si } r \in \text{Annexe 1} \quad \bar{E}_{r,t} = (1 - \gamma) \cdot E_{r,t0} < E_{r,t}$$

où γ est un taux donné de réduction ; $E_{r,t}$ et $E_{r,t0}$ représentent les émissions aux échéances t et $t0$ en l'absence de mesures de limitation et $\bar{E}_{r,t}$ correspond aux émissions à l'échéance t compte tenu des mesures de limitation.

Émissions des pays hors Annexe 1 à l'échéance t :

Si $r \in$ hors Annexe 1 $\bar{E}_{r,t}$ est tel que

$$\frac{\bar{E}_{r,t}}{POP_{r,t}} \leq \frac{\bar{E}_{Annexe1,t}}{POP_{Annexe1,t}}$$

et

$$\bar{E}_{r,t} < E_{r,t}$$

où $\bar{E}_{r,t}$ et $\bar{E}_{Annexe1,t}$ sont les émissions du pays r hors Annexe 1 et de l'ensemble des pays de l'Annexe 1 ; $POP_{r,t}$ et $POP_{Annexe1,t}$ étant les populations du pays r hors Annexe 1 et de l'ensemble des pays de l'Annexe 1.

3. Règle des «droits acquis»

Émissions mondiales à l'échéance t : $\bar{E}_t = (1-\gamma) \cdot E_{t0} \leq E_t$

où γ est un taux donné de réduction des émissions mondiales par rapport à l'échéance $t = 0$;

E_t et E_{t0} représentent les émissions mondiales aux échéances t et $t0$ en l'absence de mesures de limitation ;

et \bar{E}_t correspond aux émissions à l'échéance t compte tenu des mesures de limitation.

Émissions du pays r à l'échéance t : $\bar{E}_{r,t} = sh_{r,t0} \cdot \bar{E}_t$ si $r = 1, N$ pays/régions.

où $sh_{r,t0}$ représente la part du pays r dans les émissions mondiales en $t = 0$;

et $\bar{E}_{r,t}$, les émissions du pays/région r à l'échéance t compte tenu des mesures de limitation.

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(11 1999 03 2 P) ISBN 92-64-27113-9 – n° 50538 1999