

**COÛTS DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ :
ÉLÉMENTS D'INFORMATION FOURNIS PAR SIX MODELES GLOBAUX**

Andrew Dean et Peter Hoeller

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	18
I. Vue d'ensemble des modèles étudiés	23
II. Profils d'évolution des émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées	28
III. Analyse des scénarios de réduction	35
A. Courbes de coût global	35
B. Différents résultats régionaux suivant les modèles	38
C. Analyse des différences : importance de la substitution.	43
D. Stabilisation des émissions	45
IV. Efficacité des réductions d'émissions par rapport à leurs coûts	49
Bibliographie.....	53

Les auteurs remercient de leurs précieux commentaires et suggestions tous les auteurs dont les modèles sont examinés ici ainsi que les participants aux réunions qui ont eu lieu à Washington et à Paris en 1991. Les études concernant les six modèles auxquels il est fait référence dans cet article seront regroupées par l'OCDE au cours de l'année 1993 dans une publication intitulée *The Costs of Cutting Carbon Emissions*. Leurs remerciements vont également à Anick Lotrous et à Jackie Gardel pour les travaux techniques et les recherches qu'elles ont effectués.

INTRODUCTION

A mesure que les conséquences potentielles du changement climatique se sont faites de plus en plus inquiétantes, l'attention s'est concentrée sur les coûts probables de différentes stratégies visant à ralentir ou à interrompre ce changement. De nombreux auteurs ont analysé les divers moyens qui permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre, que l'on soupçonne d'être à l'origine du réchauffement global, et surtout les émissions de CO₂, le plus important de ces gaz. Ainsi, divers modèles économiques ont été élaborés afin d'examiner le coût probable de la réduction de ces émissions. Ces modèles concernent essentiellement les émissions de CO₂ dues à l'activité humaine, qui tiennent dans une large mesure à l'utilisation de combustibles fossiles, d'où l'importance d'une analyse détaillée de la production et de l'utilisation de l'énergie. Les résultats de ces modèles ont déjà fait l'objet de plusieurs analyses (Hoeller *et al.*, 1991; Boero *et al.*, 1991; Cliné, 1992). Cependant, chacune d'entre elles s'est heurtée au même problème, à savoir l'impossibilité de comparer des choses réellement comparables, puisqu'en général les résultats concernent des périodes différentes et s'appuient sur des hypothèses de base, des scénarios de réduction, etc. différents. Il s'est donc révélé difficile de déterminer les raisons qui sont à l'origine de la grande diversité des estimations présentées dans ces études.

Le projet d'étude comparative des modèles, entrepris par l'OCDE, vise à normaliser les principaux paramètres des différents modèles, les valeurs des variables exogènes et les objectifs de réduction, de manière à mieux comprendre de quelle manière ces modèles fonctionnent et, par conséquent, les différences qui apparaissent dans les principaux résultats, tels que les profils d'émissions de CO₂ des scénarios de référence, les taxes sur le carbone et les coûts économiques. Les principales hypothèses économiques et la spécification des scénarios de réduction sont décrites dans l'encadré.

Dans tout exercice de ce type, cependant, la normalisation se heurte à des limites importantes. Dans le cas de comparaisons entre modèles macro-économiques, il existe au moins un cadre de comptabilité nationale auquel tous les auteurs se réfèrent d'une manière ou d'une autre. S'agissant de la modélisation des émissions de CO₂ et de l'interface entre l'énergie et l'économie, les structures des modèles sont très variables, si bien que les comparaisons sont plus difficiles. En outre, chaque chercheur met l'accent sur des aspects très différents du problème – échanges commerciaux, fiscalité, évolution des secteurs producteurs d'énergie, effets à court terme ou effets à long terme, etc. – et construisent leurs modèles en conséquence. Il n'y a pas un seul modèle qui, jusqu'à présent, ait traité tous ces aspects différents en même temps. La brève description des six modèles globaux couverts par ce projet (cf. section I ci-après) met en évidence quelques-unes des principales différences qui existent entre eux et

DESCRIPTION DE L'ÉTUDE COMPARATIVE DES MODÈLES ENTREPRISE PAR L'OCDE

Pour uniformiser les modèles on a : *i)* formulé un certain nombre d'hypothèses économiques fondamentales pour le scénario de référence prévoyant une augmentation illimitée des émissions de CO₂ dans le contexte de politiques inchangées et *ii)* défini une série de simulations communes pour la réduction des émissions de CO₂.

Principales hypothèses retenues pour l'évolution des émissions dans le contexte de politiques inchangées

Les concepteurs de modèles ont été invités à s'appuyer sur les profils de croissance du PIB réel et de la population adoptés pour l'« Energy Modelling Forum » de l'université de Stanford (EMF12), ainsi que sur une hypothèse commune concernant la base des ressources et les prix du pétrole. Ces principales hypothèses sont les suivantes :

- i)* la population mondiale passe de 5.3 milliards en 1990 à 9.5 milliards en 2050 et 10.4 milliards en 2100, pour se stabiliser ensuite plus ou moins à ce niveau (projections de la Banque mondiale), cette expansion démographique intervenant presque exclusivement en Chine et dans les autres pays en développement; voir le tableau A1 pour plus de détails;
- ii)* la croissance de la production se ralentit tout au long du siècle prochain et tombe de 2½ pour cent par an dans les années 90 à 1 pour cent seulement en 2100 dans les pays de l'OCDE et de 4 à moins de 3 pour cent dans le même temps dans les pays en développement; voir le tableau A2 pour plus de détails;

(voir page suivante)

Tableau A1. **Hypothèses de croissance démographique**

Région	Niveau de 1990 (en millions)	Projections (en millions)				
		2000	2025	2050	2075	2100
États-Unis	250	267	289	285	283	284
Autres pays de l'OCDE	582	617	649	643	640	643
Ex-Union Soviétique	289	306	337	351	361	367
Chine	1 116	1 285	1 576	1 703	1 750	1 817
Reste du monde	3 024	3 701	5 339	6 546	7 143	7 310
Total mondial	5 261	6 176	8 190	9 528	10 177	10 421

(suite)

Tableau A2. Hypothèses de taux de croissance économique

Région	PIB de 1990 (en billions de dollars)	Taux de croissance du PIB (en pourcentage)				
		1990-2000	2000-2025	2025-2050	2050-2075	2075-2100
États-Unis	5.60	2.50	2.00	1.50	1.25	1.00
Autres pays de l'OCDE	10.20	2.70	2.00	1.50	1.25	1.00
Ex-Union Soviétique	2.68	3.60	3.10	2.35	2.10	1.85
Chine	1.10	4.50	4.00	3.50	3.25	3.00
Reste du monde	3.34	3.75	3.30	2.80	2.55	2.30
Total mondial	22.92	3.01	2.50	2.08	1.96	1.85

Source : Spécifications du projet EMF12.

iii) /es prix du pétrole sont fixés de façon exogène à 26 dollars le baril en 1990 et augmentent, en termes réels, de 6 dollars tous les dix ans pour atteindre 50 dollars en 2030 et rester ensuite à ce niveau. Dans le modèle GREEN de l'OCDE, les prix sont déterminés de façon endogène mais suivent le même profil que pour l'EMF12, dans l'hypothèse de politiques inchangées; dans les scénarios de réduction, ils suivent des profils différents sous l'effet des taxes sur le carbone.

Scénarios de réduction des émissions

Trois des scénarios prévoient une diminution du taux d'accroissement des émissions dans chaque région (par rapport au profil d'évolution des émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées) – de 1, 2 et 3 points de pourcentage par an, respectivement. De cette façon, l'importance de la réduction des émissions doit être identique, en pourcentage, dans les différents modèles même si les points de départ (le niveau de référence) et les niveaux atteints varient. Cette méthode implique que l'essentiel des différences entre les modèles doit être imputé à leur structure plutôt qu'à des raisons tenant à la fois à leur structure et à des différences dans la réduction des émissions – comme dans le cas d'exercices portant sur des niveaux cibles. Le quatrième scénario prévoit une stabilisation des émissions à leurs niveaux de 1990 dans chaque région. Dans ce cas, ce sont les régions, comme la Chine ou le reste du monde où les émissions progresseraient le plus rapidement dans l'hypothèse de politiques inchangées, qui seraient le plus pénalisées et la zone de l'OCDE qui le serait le moins.

Les scénarios de réduction des émissions sont appliqués Uniformément à toutes les régions alors que le taux d'accroissement des émissions dans le cas du scénario de référence varie sensiblement d'une région à l'autre. Ces réductions ne constituent aucunement une recommandation ou une suggestion. Elles sont fixées de façon uniforme uniquement pour faciliter le raisonnement sans tenir aucun compte des considé-

(voir page suivante)

(suite)

rations d'équité ou de réalisme politique. L'hypothèse d'une réduction de 1 pour cent correspondrait plus ou moins à la stabilisation des émissions dans la zone de l'OCDE et peut-être aussi dans l'ex-Union Soviétique – bien que cela dépende des niveaux de référence utilisés – et à un accroissement relativement rapide des émissions partout ailleurs. L'hypothèse d'une diminution de 2 pour cent impliquerait, par contre, une réduction absolue des émissions dans la zone de l'OCDE et l'ex-Union Soviétique parallèlement au maintien de l'accroissement des émissions dans les autres régions mais dans de très faibles proportions. Celle d'une réduction de 3 pour cent serait évidemment considérée comme extrême même si elle n'est guère éloignée de celle retenue par l'IPCC pour permettre une stabilisation des concentrations vers le milieu du siècle prochain. Ces trois scénarios recouvrent probablement l'éventail des objectifs actuellement examinés dans les instances internationales. Le moyen d'action utilisé pour obtenir ces résultats est une taxe sur le carbone, c'est-à-dire une taxe assise sur la teneur en carbone des sources d'énergie primaire.

permet de comprendre pourquoi toute tentative de comparaison dans ce domaine se heurte à un certain nombre de limites.

Les principales conclusions que l'on peut tirer du projet sont les suivantes :

- **Les profils d'évolution des émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées** sont très variables, les estimations du niveau des émissions mondiales de carbone s'échelonnant entre 22½ et 40 milliards de tonnes (section II). Un écart aussi considérable, même lorsque les hypothèses en matière de croissance démographique et de production sont uniformisées, donne à penser que l'évolution des émissions demeure très incertaine.
- L'un des facteurs considéré comme particulièrement important pour déterminer les niveaux d'émission est le rythme d'amélioration **autonome du rendement énergétique**, qui va de 0 à 1 pour cent par an dans les modèles examinés. Une différence de 0.5 point, par effet de cumul, peut aboutir à un écart de 20 milliards de tonnes en 2100 (plus de trois fois le niveau des émissions en 1990). Les incertitudes concernant l'importance de ce paramètre resteront vraisemblablement assez grandes, puisqu'il dépend du progrès technique futur.
- On observe des écarts particulièrement importants dans les prévisions concernant les émissions de la Chine; l'un des principaux facteurs semble dans ce cas être le prix des combustibles fossiles utilisés dans les différents modèles, l'augmentation des émissions la plus rapide étant prévue par le modèle GREEN, qui tient compte des distorsions qui affectent les prix de l'énergie, et incorpore donc des prix relativement bas.
- **Les taxes sur le carbone**, visant des objectifs de réduction donnés, varient considérablement suivant les régions et les modèles. Dans tous les modèles, elles augmentent progressivement, ce qui indique que plus on voudra réduire les émissions, plus les taxes sur le carbone devront augmenter (section III). La

réduction des émissions, qui devrait être relativement peu coûteuse au départ, ne sera importante qu'au, prix de taux d'imposition très élevés. Ainsi, pour réduire les émissions aux Etats-Unis en 2020 de 45 pour cent par rapport à leur niveau de référence (comme dans le scénario de réduction de 2 pour cent du taux annuel de croissance des émissions), les taxes sur le carbone devraient se situer entre 200 et 350 dollars par tonne, alors que l'impôt sur les produits énergétiques s'élève actuellement dans ce pays à 30 dollars par tonne environ. Dès que de nouvelles technologies de recharge, exemptes de carbone, deviennent largement répandues, le prix de leur utilisation limite le montant nécessaire de la taxe sur le carbone². Dans les modèles qui ne font pas intervenir des technologies de recharge, les taxes sur le carbone atteignent 1 000 dollars ou plus. Il faudrait rassembler davantage d'informations sur le coût probable et la rapidité de diffusion de ces technologies de recharge.

- Les **coûts économiques** connexes, mesurés ici en termes de pertes de PIB, accusent aussi de très fortes variations suivant les modèles et les régions (section III). Les pertes de PIB sont en général assez importantes pour la région « reste du monde », qui comprend les principaux pays en développement producteurs de pétrole, mais sont moins marquées pour les autres régions. Le classement, par région, des coûts de la lutte contre la pollution varie d'un modèle à l'autre. Dans le cas du scénario prévoyant une réduction des émissions de 2 pour cent, la perte de PIB en 2020 est comprise entre % et 2 pour cent du PIB dans les pays de l'OCDE et entre environ 1/2 et 3 pour cent du PIB en Chine et dans l'ex-Union Soviétique. De même que les taux d'imposition, les pertes de PIB ont tendance à s'accroître avec l'augmentation des niveaux de réduction des émissions, sauf quand l'existence de technologies de recharge vient limiter les taxes et donc les coûts.
- Les **possibilités de substitution** supposées entre les différents combustibles fossiles, entre les combustibles fossiles et non fossiles et entre l'énergie et les autres facteurs de production semblent influencer de manière déterminante sur les différences entre les taxes nécessaires et les pertes de production d'un modèle à un autre (section III). Lorsque les élasticités de substitution sont faibles, l'ajustement des émissions implique généralement une réduction de l'intensité énergétique et des niveaux de production qui ne peut être réalisée qu'à l'aide de taxes élevées. Par contre, lorsque les élasticités de substitution sont élevées, cela favorise un changement de combustibles, ce qui a en général pour effet de réduire le niveau des taxes et des coûts.
- **La composition de la demande de référence d'énergie primaire et les prix relatifs de l'énergie** déterminent aussi dans une large mesure l'ampleur des substitutions possibles et le niveau d'imposition nécessaire pour favoriser les changements de combustibles; dans les modèles qui, du fait de distorsions sur les marchés de l'énergie, donnent pour la Chine et pour l'ex-Union Soviétique une plus grande part au charbon et de plus faibles prix de l'énergie, le niveau des taxes et des coûts est moins élevé que dans ceux qui reposent sur des combustibles aux prix mondiaux et un scénario de référence utilisant des combustibles à plus faible teneur en carbone.
- **Les échanges de droits d'émission** permettraient de réduire considérablement le coût global et régional des réductions d'émissions du fait de la forte dispersion des taxes sur le carbone et des coûts marginaux de la lutte contre la

pollution entre les régions. Les coûts globaux de réduction des émissions s'en trouveraient presque réduits de moitié dans le modèle GREEN, mais moins sensiblement dans les deux autres modèles (ERM et MR) (section IV).

Une mise en garde s'impose sur la nature des comparaisons présentées ici entre les différents modèles. Aucun des scénarios ne vise à étayer des recommandations. Ils ont tous pour objet d'illustrer les différences techniques entre les modèles. S'ils peuvent susciter des réflexions importantes sur les mesures à prendre, aucun d'eux n'est activement recommandé dans les négociations en cours. La stabilisation des émissions a certes été retenue comme un objectif dans l'accord-cadre, mais seulement pour les pays développés. De plus, les coûts de la réduction des émissions de CO₂, liées aux produits énergétiques ne constituent qu'un aspect d'un problème plus complexe faisant intervenir d'autres sources et capteurs de CO₂, d'autres gaz à effet de serre et des estimations incertaines quant à l'impact des changements climatiques.

I. VUE D'ENSEMBLE DES MODÈLES ÉTUDIÉS

Le projet d'étude comparative de l'OCDE porte sur l'ensemble des modèles globaux disponibles actuellement qui permettent de simuler suivant les régions le profil des taxes sur le carbone et les pertes de production résultant d'une limitation des émissions de carbone. Les principales caractéristiques des six modèles globaux sont indiquées au tableau 1. Les différences entre les modèles ont une grande influence sur le type de comparaison que l'on peut envisager et, malgré l'harmonisation des données de référence et des scénarios, elles limitent les comparaisons que l'on peut faire entre les résultats. Les diverses catégories de facteurs qui limitent les comparaisons sont analysées ci-après en fonction des caractéristiques principales des modèles.

Type de modèle. Un modèle d'équilibre général comparatif statique, le modèle Whalley-Wigle (WW), est utilisé pour obtenir des résultats moyens sur la période 1990-2100, en valeurs actuelles. Ce type de modèle ne permet pas d'obtenir des profils dynamiques, si bien que les résultats ne peuvent pas être présentés suivant le profil temporel utilisé pour les cinq autres modèles. Le modèle de l'AIE est un modèle d'équilibre partiel reposant sur des estimations économétriques du secteur de l'énergie, mais il ne tient pas compte de la rétroaction des secteurs énergétiques sur l'ensemble de l'économie; les résultats ne concernent donc que les taxes sur le carbone, sans rendre compte des effets sur le PIB. Les quatre autres modèles – Edmonds-Reilly (ERM), Global 2100 de Manne-Richels (MR), Carbon Rights Trade Model de Rutherford (CRTM) et le modèle de l'OCDE (GREEN) – sont tous des modèles dynamiques d'équilibre partiel ou général comportant des variables plus ou moins détaillées par secteur et par type d'énergie.

Les modèles GREEN et WW ont été construits pour examiner la question du CO₂ dans une optique macro-économique et commerciale générale, tandis que les modèles ERM, MR et celui de l'AIE ont été mis au point en tant que modèles énergétiques

Tableau 1. Résumé des modèles considérés¹

	Type de modèle	Horizon	Régions	Types de combustible	Commentaires
CRTM (Rutherford)	modèle commercial d'équilibre général dynamique, récursif, calculé sur Global 2100	2100	cinq	sept y compris les technologies de rechange	axé sur l'impact des restrictions sur les échanges internationaux; droits négociables
ERM (Edmonds-Reilly)	modèle d'équilibre partiel avec sous-modèle dynamique détaillé sur l'énergie	2095	neuf	six primaires et quatre secondaires	échanges d'énergie; inclut d'autres gaz à effet de serre; liens énergie-économie simples
GREEN	modèle d'équilibre général dynamique, récursif	2050	douze	trois primaires, deux secondaires, plus trois technologies de rechange	ensemble des relations commerciales; droits négociables; prix du pétrole endogène
AIE	modèle énergétique détaillé reposant sur des estimations économétriques	2005	dix	cinq avec de nombreuses ventilations par produits	nombreux détails pour la zone OCDE; pas de rétroaction du secteur énergétique sur le reste de l'économie
MR (Global 2100; Manne-Richels)	modèle d'optimisation dynamique intertemporel avec modèle énergétique détaillé	2100	cinq	neuf y compris les technologies de rechange	modèle prospectif intertemporel; ne tient compte que des échanges pétroliers; droits négociables
WW (Whalley-Wigle)	modèle d'équilibre général comparatif, statique	1990-2100	six	deux	relations commerciales; axé sur l'impact international des taxes sur le carbone

1. Ce tableau décrit les versions des modèles utilisées dans ce projet. On trouvera une description des modèles et de leurs résultats dans les documents de travail établis spécialement pour ce projet; voir Barns et al. (1992), Manne (1992), Oliveira-Martins et al. (1992), Rutherford (1992), Vouyoukas (1992) et Whalley et Wigle (1992). Ces études seront regroupées dans une publication à paraître de l'OCDE, *The Costs of Cutting Carbon Emissions*.

détaillés. Le CRTM repose sur les mêmes données et la même approche que le MR. En revanche, il traite de façon cohérente les flux d'échanges mondiaux, ce qui n'est pas le cas du modèle MR, mais cette cohérence est assurée, pour l'instant, par l'utilisation d'une structure récursive et non prospective. Le CRTM et le MR sont des modèles d'optimisation qui intègrent de nombreuses options technologiques diffé-

rentes, tandis que les possibilités de substitution sont continues dans les modèles ERM, GREEN et WW.

Même avec des types de modèles similaires, les valeurs des paramètres des principales relations peuvent être très différentes. Certaines de ces différences sont indiquées dans le tableau 2, qui donne des informations sur le rendement énergétique, les élasticités de substitution et certains autres paramètres. Certaines des différences dans les profils d'émissions et les résultats des scénarios de référence, examinées ci-après, peuvent s'expliquer par les différences indiquées dans ce tableau. Beaucoup d'autres divergences ne sont pas mises en évidence ici. De plus, les diverses différences interagissent si bien qu'il devient de plus en plus difficile, au-delà d'un certain point, de décomposer les différences apparaissant dans les résultats afin de les attribuer à certains paramètres, à la structure du modèle ou à des variations des données. Il a été possible de déterminer les raisons qui sont à l'origine de certaines des principales différences observées dans les résultats, sans toutefois en établir précisément les causes. Certaines raisons demeurent obscures.

Horizon temporel. Quatre modèles (CRTM, ERM, MR et WW) ont un horizon à long terme allant jusqu'à la fin du siècle prochain, mais les résultats du dernier de ces modèles pour la période 1990-2100 sont donnés en valeurs actualisées de 1990. Les autres modèles ont des horizons temporels plus courts : 2050 pour GREEN et 2005 pour le modèle de l'AIE. Sur la courte période (en termes de changement climatique) du modèle de l'AIE, le renouvellement du stock de capital est relativement limité, tandis qu'à plus long terme, les coûts d'ajustement sont un facteur moins important étant donné que le stock de capital peut être entièrement renouvelé. Les technologies de rechange tendent à devenir de plus en plus importantes.

Régions. La structure régionale des différents modèles ne correspond pas toujours à celle qui a été spécifiée pour le projet. Celle-ci – Etats-Unis, autres pays de l'OCDE, Chine, ex-Union Soviétique et reste du monde – est fondée sur la structure du modèle MR et est donc également utilisée pour le CRTM. Le modèle GREEN peut aussi respecter cette structure en cinq régions, mais ses résultats sont présentés, dans Oliveira-Martins *et al.* (1992) pour douze régions différentes. Le modèle ERM comprend dix régions qui peuvent être regroupées pour correspondre aux cinq groupes ci-dessus, sauf l'ex-Union Soviétique et la Chine, puisque les pays d'Europe de l'Est et les pays d'Asie à économie planifiée sont respectivement inclus dans ces deux groupes, ce qui réduit d'autant la taille du groupe « reste du monde ». Le modèle de l'AIE comprend un groupe Amérique du nord, et donc un groupe « autres pays de l'OCDE » qui exclut le Canada, tandis que les groupes de pays non membres sont compatibles pour ce qui est des émissions de référence de CO₂ mais ne sont pas modélisés pour la construction de scénarios. Le modèle WW comporte lui aussi un groupe « Amérique du nord », si bien que le groupe « autres pays de l'OCDE » est légèrement réduit, ainsi qu'un groupe « exportateur de pétrole » et un groupe « reste du monde ». Il en résulte que les comparaisons régionales sont possibles entre les modèles MR, CRTM et GREEN, qu'elles sont moins fiables avec le modèle ERM et celui de l'AIE (qui est également incomplet) et qu'elles sont très problématiques (dans le contexte de cet exercice) avec le modèle WW.

Sources d'énergie. Ainsi qu'on l'a vu plus haut, les modèles GREEN et WW sont moins détaillés que les autres en ce qui concerne les sources d'énergie. C'est toutefois le modèle WW qui est le plus rudimentaire, puisqu'il ne comporte qu'un combustible fossile composite et un combustible non fossile. Cela signifie que la substitution entre

Tableau 2. Principaux paramètres ¹

	États-Unis	Autres pays de l'OCDE		Ex-Union Soviétique	Chine	Reste du monde		
Amélioration autonome du rendement énergétique (AEEI) :								
ERM	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
GREEN	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
AIE ¹	-1.1	-1.1						
MR ³	0.5	0.5	0.25	1.0	0.0	0.0	0.0	
WW	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Élasticité de substitution entre l'énergie et les autres facteurs de production :								
ERM	E-K		E-K		E-K		E-K	
GREEN ⁴	0.6	L-KE	0.6	L-KE	0.6	L-KE	0.6	L-KE
AIE								
MR	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
WW ⁵	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
Élasticité de substitution entre combustibles dans la production :								
ERM								
GREEN	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
AIE ²	-0.5	-0.5	..	..	..	..	..
MR								
WW	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
Élasticité de substitution entre combustibles dans la demande finale :								
ERM								
GREEN	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
AIE	..	..	..	..	..	..	..
MR								
WW	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
Élasticité de l'offre d'énergie :								
ERM	Pétrole		1.0					
	Charbon		1.0					
GREEN	Source d'énergie exempte de carbone		0.2					
	Charbon		5.0					
	Pétrole		entre 1 et 3					
WW	Source d'énergie à base de carbone		1.0					
	Source d'énergie exempte de carbone		1.0					

1. La ventilation régionale n'est pas la même dans tous les modèles; se reporter au texte.

2. Il s'agit de moyennes approximatives des diverses valeurs des paramètres pour différents combustibles et secteurs.

3. L'AEEI est la même pour toutes les régions à partir de 2050 (0.5).

4. E-K : élasticité de substitution entre l'énergie et le capital. L-KE : élasticité de substitution entre le travail d'une part et le capital et l'énergie de l'autre. Il s'agit d'élasticités sur longue période; les élasticités à court terme équivalent à un dixième environ des valeurs à long terme.

5. Pour la production d'énergie, l'élasticité est 1.0.

combustibles fossiles – importante dans la plupart des modèles jusqu'à une date avancée au cours du siècle prochain – n'est pas possible dans WW, facteur important à prendre en considération lorsqu'on examine les coûts de la réduction des émissions de CO₂. Pour les autres modèles, la substitution entre combustibles à teneur en carbone différente est un aspect important des profils d'émissions de référence et des scénarios de réduction.

Technologies de rechange. Suivant les hypothèses de l'Energy Modelling Forum (cf. encadre), les technologies de rechange entrent en service en 2010 et sont exploitables pour le même coût marginal constant dans toutes les régions. Des technologies de rechange à forte teneur en carbone (schistes bitumineux, par exemple) et exemptes de carbone (énergie solaire, par exemple) sont disponibles pour tous les combustibles fossiles et l'électricité, les secondes étant beaucoup plus coûteuses que les premières. Il n'y a pas de technologies de rechange dans les modèles WW et ERM, et cette omission a une influence déterminante sur les résultats, puisqu'il n'y a pas de plafond effectif à la taxe sur le carbone. Alors que le modèle de l'AIE est beaucoup plus détaillé sur le plan des technologies, les technologies de rechange sont beaucoup moins importantes à court terme, c'est-à-dire jusqu'en 2005. En revanche, les modèles MR, CRTM et GREEN comportent des technologies de rechange qui limitent la taxe sur le carbone et, partant, le coût de la réduction des émissions.

Sources d'information. En plus de ces différences de structures entre les six modèles, d'importantes variations affectent les données relatives à l'année de référence. Cela tient au fait que les différents modèles s'appuient sur des données, des définitions, des points de départ différents (taux de change, prix de l'année de référence, etc.) et qu'un certain nombre d'estimations ont dû être effectuées pour obtenir un point de départ cohérent en 1990. Ces estimations, réalisées au moyen des modèles à partir de données concernant des années antérieures, étaient nécessaires soit parce qu'on ne disposait pas des données adéquates, soit parce que pour de nombreuses séries les données relatives à 1990 (point de départ de l'analyse) n'étaient pas disponibles.

Une annexe de l'étude de Dean et Hoeller (1992) contient davantage d'informations sur les problèmes liés au choix des données. Le point le plus important, dans la mesure où il influe sur les émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées et sur les résultats des scénarios, de réduction, concerne l'utilisation de prix de référence différents pour l'énergie. Étant donné que le remplacement de combustibles par d'autres est essentiellement motivé par les prix, toute différence dans les prix relatifs de l'énergie peut entraîner des différences considérables dans le dosage des combustibles et, donc, dans les émissions, dans l'hypothèse de politiques inchangées. Dans les scénarios de réduction des émissions, les taxes sur le carbone étant fonction de la valeur absolue du carbone contenu dans les différents combustibles, les différences dans les prix relatifs de l'énergie, que ce soit à l'intérieur de chaque modèle ou entre les modèles, risquent d'entraîner des différences encore plus importantes dans les résultats. Les différences de prix de référence sont particulièrement sensibles dans le cas de la Chine et de l'ex-Union Soviétique, étant donné que les très importantes subventions sur l'énergie dans ces régions ne sont pas prises en compte dans tous les modèles.

II. PROFILS D'ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS DANS L'HYPOTHÈSE DE POLITIQUES INCHANGÉES

Même lorsque les hypothèses en matière de croissance de la production, de la population et des ressources sont harmonisées, les profils des émissions dans le cas de politiques inchangées varient considérablement d'un modèle à l'autre. C'est là un point préoccupant, étant donné que le coût de la réalisation de tout objectif de **niveau** d'émission dépend essentiellement de la nature de la référence, c'est-à-dire de la « distance » qu'il faut couvrir. En pareil cas, ce n'est pas seulement la quantité absolue de tonnes de carbone qui varie suivant les modèles, mais aussi la réduction proportionnelle à effectuer.

Les profils d'évolution des émissions de CO₂ dans l'hypothèse de politiques inchangées sont indiqués dans le graphique 1, les nombres exacts et les détails par région étant donnés dans les tableaux 3 et 4. Il y a quelques différences dans le **point de départ** des émissions de CO₂ liées à l'utilisation d'énergie en 1990. La différence initiale n'est pas négligeable, mais elle n'est pas surprenante étant donné que les données relatives à 1990 sont des estimations calculées sur la base de données relatives à la consommation d'énergie des années précédentes et par application de « coefficients d'émission de carbone » pour différentes catégories de combustibles³.

Les émissions mondiales augmentent plutôt plus rapidement à court ou moyen terme dans le modèle GREEN et dans celui de l'AIE que dans les autres modèles (graphique 1 et tableau 3). Le taux le plus faible est donné par l'ERM. Le rythme de progression envisagé dans le modèle GREEN peut être supérieur de 1/2 pour cent par an à celui suggéré dans l'ERM jusqu'à 2020, bien que les deux modèles reposent sur la même hypothèse d'une amélioration autonome du rendement énergétique de 1 pour cent par an. De ce fait, un écart de plus de 2 1/2 milliards de tonnes de carbone apparaît en 2020 entre la limite supérieure et la limite inférieure des modèles, à savoir les 10.8 milliards de tonnes du modèle GREEN et les 8.2 milliards de tonnes du modèle ERM (tableau 3).

Au-delà de 2020, période pour laquelle on ne peut comparer directement que les modèles CRTM, ERM, MR et GREEN (jusqu'en 2050), les divergences observées pour la période antérieure s'accroissent au point que les projections données pour les émissions mondiales vont pratiquement du simple au double pour l'année 2100 (graphique 1). Naturellement, des différences qui peuvent sembler relativement minimes entre les taux annuels d'augmentation des émissions de CO₂ se soldent, au bout d'un siècle, par des différences de niveau importantes (tableau 3). Toutes les estimations des modèles sont néanmoins supérieures au nouveau schéma de référence de l'IPCC (figurant dans le supplément IPCC de 1992), qui prévoit un niveau de 19.8 milliards de tonnes de carbone en 2100. L'IPCC envisage toutefois cinq autres scénarios qui donnent des niveaux compris entre 4.6 milliards de tonnes (scénario reposant sur une faible expansion démographique, des taux de croissance moindres et de faibles ressources en pétrole et en gaz) et 34.9 milliards de tonnes (dans le cas d'une progression plus rapide du PNB par tête, d'un abandon du nucléaire et de ressources abondantes en combustibles fossiles).

Graphique 1. Émissions mondiales de CO₂ dans l'hypothèse de politiques inchangées

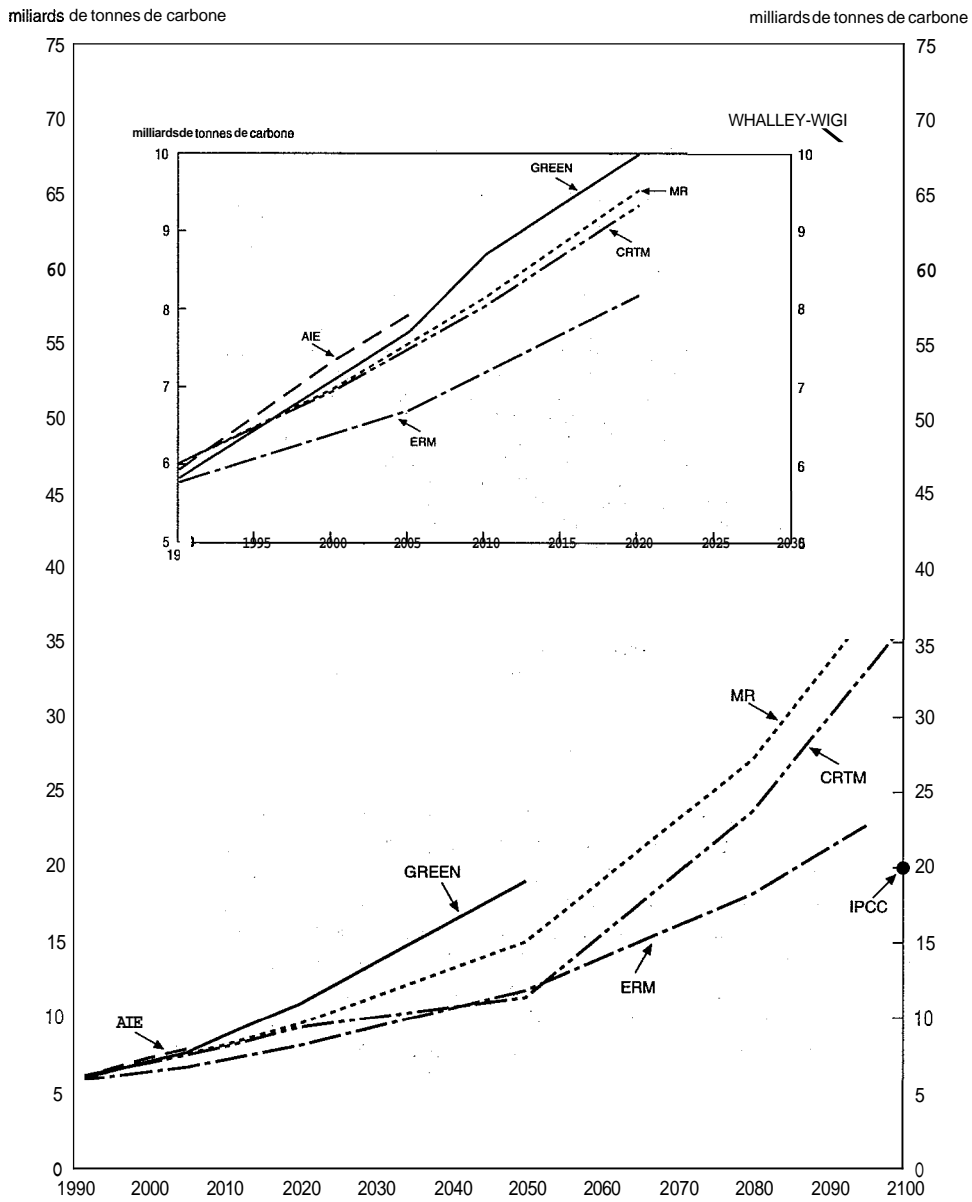


Tableau 3. Émissions mondiales de CO₂ dans l'hypothèse de politiques inchangées

En milliards de tonnes de carbone

	CRTM	ERM (1)	ERM (2)	GREEN (1)	GREEN (2)	AIE ^{**}	MR (1)	MR (2)	WW
1990	6.003	5.767	5.767	5.815	5.815	5.919	6.003	6.003	[moy. 1990 à 2100 : 25.21
2000	6.931			7.071	7.418	7.316	6.970	6.748	
2005	..	6.709	7.856	7.704	8.250	7.932	..		
2010	8.031			8.705	9.452		8.153	7.581	
2020	9.327	8.180	10.505	10.806	11.938		9.520	8.681	
2050	11.337	11.838	17.606	18.998	21.769		14.992	11.356	
2080	23.519	18.099	32.185				26.945	18.701	
2100	35.863	22.579	41.594				39.636		

* 2095

** Les projections du modèle de l'AIE ont été ajustées ici pour exclure les combustibles non fossiles solides, les réserves en stock, l'emploi des combustibles fossiles à des fins non énergétiques et les approvisionnements de la pétrochimie. Ces catégories, qui entrent normalement en compte dans le calcul de la production dans le modèle de l'AIE, n'ont pas été exclues des tableaux de l'annexe ni des résultats indiqués dans le document de l'AIE et augmentent d'environ 900 millions de tonnes le niveau global des émissions de carbone en 1990.

Notes : Dans les trois cas (ERM, MR et GREEN) où deux profils d'évolution des émissions sont indiqués, le chiffre donné dans la première colonne correspond à la version de base du modèle et celui donné en italique dans la deuxième colonne montre la sensibilité du résultat à une hypothèse différente en matière d'amélioration autonome du rendement énergétique (AEEI). Celle-ci est de 1 pour cent par an pour ERM (1), GREEN (1) et MR (2) et de 1/2 pour cent par an pour ERM (2), GREEN (2) et MR (1).

CRTM = Carbon Rights Trade Model (Rutherford, 1992)

ERM = Modèle de Edmonds et Reilly (Barns et al., 1992)

GREEN = Modèle de l'OCDE (Oliveira-Martins et al., 1992)

AIE = Modèle de l'Agence internationale de l'énergie (Vouyoukas, 1992)

MR = Modèle Global 2100 de Manne et Richards (Manne, 1992)

WW = Modèle de Whalley et Wigle (Whalley et Wigle, 1992)

L'importance du rôle joué par l'amélioration autonome du rendement énergétique (AEEI) dans ces grandes différences de niveau d'émission est mise en lumière par des tests de sensibilité (cf. tableau 3). Dans un autre scénario reposant sur l'hypothèse de politiques inchangées et utilisant le modèle ERM mais ramenant le taux de croissance de l'AEEI de 1 à 1/2 pour cent par an dans toutes les régions (ce qui correspond à peu près à l'hypothèse retenue dans le modèle MR), les émissions mondiales passent de 22 1/2 à quelques 42 milliards de tonnes à la fin du siècle prochain, soit un niveau très voisin de celui obtenu par le modèle MR. En procédant à un exercice analogue avec le modèle MR mais en faisant cette fois passer l'AEEI à 1 pour cent par an dans toutes les régions, on obtient un niveau d'émission de 26 milliards de tonnes en 2100, niveau beaucoup plus proche de celui de 22 1/2 milliards de tonnes donné par la version de base de l'ERM. En revanche, en réduisant l'AEEI à 1/2 pour cent dans le modèle GREEN, les émissions en 2050, déjà plus élevées que dans les autres modèles, atteindraient un niveau encore plus élevé (21.8 milliards de tonnes, contre 19 milliards de tonnes dans le modèle standard avec une AEEI de 1 pour cent)⁴.

Malheureusement, les études économétriques ne permettent guère de se prononcer sur la valeur spécifique de l'AEEI, si bien que les concepteurs de modèles ont dû l'estimer de leur mieux⁵. Les modèles MR et CRTM utilisent des valeurs initiales différentes pour différentes régions, le taux de croissance de l'AEEI étant minimum

dans l'ex-Union Soviétique (0.25 pour cent), d'un niveau intermédiaire dans la zone de l'OCDE (0.5 pour cent) et maximum en Chine (1.0 pour cent). Ces valeurs s'appuient sur l'hypothèse que les pays où les niveaux d'industrialisation sont les plus faibles sont ceux qui ont la plus forte capacité de progrès techniques, mais les niveaux d'AEEI convergent ensuite autour de 0.5 dans toutes les régions vers le milieu du siècle prochain. Comme on l'a déjà dit, les modèles ERM et GREEN évaluent l'AEEI à 1 pour cent, ce qui correspond à peu près au pourcentage donné par le modèle de l'AIE, tandis que le modèle WW lui assigne la valeur la plus faible, puisqu'elle est nulle. L'impossibilité de confiner ce paramètre dans une marge beaucoup plus étroite gêne considérablement l'évaluation précise du profil d'évolution future des émissions de CO₂. Cette incertitude ne peut être passée sous silence.

Étant donné le ralentissement supposé de la croissance démographique et de la croissance du PIB dans toutes les régions au cours du siècle prochain, l'augmentation des émissions de CO₂ devrait se ralentir, à peu près au même rythme, puisque les principaux facteurs d'émission sont la consommation et la production. Or, les profils des émissions de référence peuvent considérablement varier en fonction des progrès techniques et des possibilités de substitution. Par ailleurs, les modèles font apparaître des différences dans la spécification technique du lien entre émissions et activités dans différents secteurs et dans les possibilités de substitution. L'évolution du rendement énergétique et celle du dosage des combustibles utilisés (la proportion de carbone n'est pas la même dans tous les combustibles), deux facteurs qui ont une influence importante sur les émissions, sont très différentes suivant les modèles. Ainsi, malgré le ralentissement de la croissance démographique et de la croissance de la production, l'augmentation des émissions mondiales de CO₂ dans les modèles CRTM et MR est sensiblement plus rapide pendant la deuxième moitié du XXI^e siècle, et un peu plus rapide également dans le modèle ERM (tableau 4).

L'évolution de la structure de la consommation de combustibles contribue évidemment de façon importante à expliquer l'augmentation des émissions, les ressources en gaz naturel (le combustible le plus « propre » en termes de teneur en carbone) finissant par s'épuiser. Cette évolution s'accompagne d'une plus grande utilisation du charbon, dont les réserves sont importantes, et de combustibles de synthèse encore plus polluants. On peut en effet s'attendre à ce que ces combustibles soient de plus en plus employés en l'absence de mesures visant à réduire les émissions de CO₂ ou de technologies de rechange, exemptes de carbone, relativement bon marché. Toutefois, ceci serait également compensé par l'utilisation de combustibles non fossiles, et l'accélération ou le ralentissement de la croissance des émissions dépendrait des changements précis qui interviendraient dans le dosage des différents combustibles.

On observe d'importantes **différences régionales dans les profils d'évolution des émissions utilisées comme référence** (tableau 4). Jusqu'en 2050, les taux de croissance estimés des émissions dans la zone de l'OCDE sont relativement proches les uns des autres, et diminuent tous au cours de cette période, mais les prévisions sont très divergentes en ce qui concerne les régions situées en dehors de la zone de l'OCDE. La différence la plus importante tient au fait que le modèle GREEN fait apparaître une croissance sensiblement plus forte des émissions de la Chine que les autres modèles. La même remarque s'applique, dans une moindre mesure, à l'ex-Union Soviétique et à la région relativement hétérogène qui constitue le « reste du monde ». La croissance plus rapide des émissions dans ces régions s'explique dans une large mesure par la faiblesse des prix de la plupart des sources d'énergie figurant

Tableau 4. **Comparaison des taux moyens d'augmentation des émissions de CO2 des différents modèles, 1950-2100**

Variations annuelles moyennes en pourcentage

	Données rétrospectives				Projections de référence				
	1950-75	1975-80	1980-85		1985-90	1990-2000	2000-2020	2020-2050	2050-2100
États-Unis	2.3	1.4	-1.0	CRTM		1.5	1.1	0.7	1.1
				ERM ¹	1.8	0.8	0.8	0.7	0.6
				GREEN	1.1	1.1	1.1	0.7	
				AIE ²	1.3	1.5	0.7		
				MR		1.4	1.2	1.5	0.7
Autres pays de l'OCDE	2.7	1.8	-1.2	CRTM		1.9	1.2	0.6	1.3
				ERM ¹	1.9	1.4	0.8	0.4	0.5
				GREEN	1.7	1.4	0.7	1.0	
				AIE ²	2.0	1.3	1.0		
				MR		1.8	1.3	1.3	0.9
Ex-Union Soviétique	5.9	2.5	1.9	CRTM		1.1	1.1	-1.3	1.1
				ERM ¹	1.3	-0.2	0.6	0.5	1.0
				GREEN	1.6	1.9	1.8	1.0	
				AIE ²	2.0	1.9	0.2		
				MR		1.2	1.1	-0.3	1.1
Chine	11.2	5.3	5.4	CRTM		1.4	2.0	1.8	3.4
				ERM ¹	2.9	2.3	3.0	2.6	2.3
				GREEN	3.1	3.7	4.6	3.2	
				AIE ²	4.4	3.3	3.1		
				MR		1.6	2.2	2.6	3.0
Reste du monde	4.7	5.4	2.4	CRTM		1.3	2.0	1.8	2.5
				ERM ¹	2.8	1.5	2.0	1.7	1.6
				GREEN	2.6	2.6	2.8	2.3	
				AIE ²	2.8	3.0	2.8		
				MR		1.5	2.2	1.9	2.5
Monde	3.6	2.6	0.8	CRTM		1.4	1.5	0.7	2.3
				ERM ¹	2.0	1.0	1.3	1.2	1.4
				GREEN	1.8	2.0	2.1	1.9	
				AIE ²	2.3	2.1	1.6		
				MR		1.5	1.6	1.5	2.0

1. Les quatre dernières périodes sont : 1990-2005, 2005-2020, 2020-2050 et 2050-2095.

2. Les périodes sont : 1987-1990, 1990-2000 et 2000-2005.

Sources : Les données rétrospectives sur les émissions sont celles fournies par Edmonds et Barns (1990).

dans la base de données du modèle GREEN, censée être représentative. La faiblesse des prix de l'énergie encourage l'utilisation de charbon et fait obstacle à l'introduction progressive de technologies de rechange exemptes de carbone. Si les distorsions affectant les prix de l'énergie dans ces régions étaient éliminées, les émissions mon-

diales de carbone en 2050 seraient ramenées, dans le modèle GREEN, de **19 milliards** à **15 milliards** de tonnes.

Au-delà de 2050, les écarts de taux de croissance entre les modèles et les régions se réduisent quelque peu. Pour l'OCDE, le taux de croissance annuel des émissions est ramené aux alentours de **1** pour cent dans les modèles CRTM et MR et à un peu plus de $\frac{1}{2}$ pour cent dans le modèle ERM. Pour les autres régions, les émissions progressent fortement dans les modèles CRTM et MR, tandis que leur croissance reste à peu près identique dans le modèle ERM.

La **contribution a la croissance des émissions** des modifications du dosage des combustibles et de l'intensité énergétique de la production peut être calculée au moyen de séries qui s'y rapportent dans chaque modèle. Le profil d'évolution des émissions de CO₂ (C) par unité produite dépend :

- i) des coefficients d'émission des différents combustibles à base de carbone,
- ii) du dosage des différents combustibles (entre combustibles à base de carbone (FE) et exempts de carbone), et
- iii) de l'utilisation d'énergie (E) par unité produite (PIB).

Pour toute période donnée, l'intensité des émissions (carbone (C) par unité de PIB) peut être décomposée en plusieurs parties au moyen de l'identité suivante :

$$C/PIB \equiv C/FE \cdot FE/E \cdot E/PIB \quad [1]$$

Avec le temps, les différences premières dans les logarithmes des variables figurant dans la partie droite de l'identité indiquent leurs contributions respectives aux changements d'intensité des émissions :

$$\Delta \ln C/PIB \equiv \Delta \ln C/FE + \Delta \ln FE/E + \Delta \ln E/PIB \quad [2]$$

Le premier terme de la partie droite de l'identité représente l'effet des changements intervenant dans le dosage des combustibles à base de carbone sur les émissions⁶. Le deuxième terme représente la contribution du remplacement de ces combustibles par des combustibles exempts de carbone à une réduction des émissions. Ces deux termes traduisent donc la contribution de la substitution entrécombustibles aux variations de l'intensité des émissions. Le dernier terme représente l'effet de l'évolution de l'intensité énergétique globale, c'est-à-dire du degré d'économies d'énergie, sur les émissions.

Les variations du PIB sont les mêmes (par hypothèse) dans tous les modèles. Entre 1990 et 2020, le PIB global est multiplié par plus de deux. L'utilisation totale d'énergie augmente moins. Une diminution tendancielle de l'intensité énergétique contribue en effet à faire baisser d'environ $\frac{1}{2}$ à **1** point par an l'intensité globale des émissions de carbone dans tous les modèles (tableau 5). La différence entre les baisses tendancielle d'intensité des émissions de 0.6 pour cent (GREEN) et **1.4** pour cent (ERM) par an n'est guère influencée par les différences dans les contributions des deux autres facteurs, à savoir la teneur en carbone des combustibles carbonés et la part des combustibles exempts de carbone.

Dans le modèle GREEN, la baisse tendancielle de l'intensité énergétique globale se poursuit au même rythme entre 2020 et 2050, tandis que dans les modèles ERM et MR, elle diminue considérablement entre 2020 et la fin du siècle. De fait, le niveau de référence du modèle MR accuse même une légère augmentation tendancielle. La différenciation en partie à des hypothèses différentes quant à l'amélioration du rende-

Tableau 5. **Décomposition des scénarios de référence**
 Pourcentages de variation annuels moyens pour l'économie mondiale

	ERM			GREEN		AIE	MR		
	1990-2020	2020-2050	2050-2100	1990-2020	2020-2050	1990-2005	1990-2020	2020-2050	2050-2100
Intensité d'émission totale	-1.4	-0.8	-0.4	-0.6	-0.2	-1.0	-0.9	-0.4	0.1
Teneur en carbone des combustibles fossiles ¹	-0.1	0.2	0.3	0.0	0.5	0.0	0.4	0.2	0.2
Part des combustibles exempts de carbone	-0.1	-0.2	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.8	-0.1
Intensité énergétique	-1.1	-0.8	-0.5	-0.6	-0.6	-1.0	-1.1	0.2	0.0

1. Y compris les combustibles de synthèse à base de carbone.

ment énergétique. Toutefois, la croissance beaucoup plus rapide des pays ayant une intensité énergétique plus élevée au départ (et la dernière année) joue aussi un certain rôle. De plus, les variations des prix relatifs influent sur l'intensité énergétique, mais il est difficile d'isoler les effets de ce facteur.

Une augmentation de l'intensité en carbone de la demande d'énergie accroît l'intensité des émissions dans les deux modèles et dans le modèle GREEN jusqu'en 2050 : le charbon et les combustibles de synthèse à base de carbone gagnent des parts de marché. D'un autre côté, l'augmentation des émissions est freinée par l'expansion rapide des sources d'énergie exemptes de carbone dans les modèles MR et ERM. Au total, la baisse tendancielle de l'intensité globale en carbone se ralentit considérablement après 2020 dans les modèles MR et ERM, compensant ainsi l'effet du ralentissement de la croissance démographique et économique sur l'augmentation des émissions.

La grande diversité des estimations des émissions jusqu'à la fin du siècle prochain dans l'hypothèse de politiques inchangées contraste vivement avec la relative précision des chiffres donnés dans le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental pour l'étude des changements climatiques (IPCC). Le scénario reposant sur l'hypothèse de politiques inchangées aboutit à une estimation de 22½ milliards de tonnes en 2100, parmi les estimations les plus basses présentées ici. Ce chiffre a depuis lors été révisé à la baisse à un peu moins de 20 milliards de tonnes (graphique 1), mais, ainsi qu'on l'a vu plus haut, l'IPCC propose maintenant toute une gamme de scénarios avec des émissions très variables. Il est manifeste qu'une marge d'incertitude considérable entoure tous ces chiffres, ce qui complique évidemment l'estimation du coût de la réalisation d'objectifs spécifiques en matière d'émission de CO₂. C'est l'une des raisons pour lesquelles cette étude comparative concerne principalement la réduction des taux de croissance des émissions, plutôt que celle des niveaux d'émission.

III. ANALYSE DES SCÉNARIOS DE RÉDUCTION

A. Courbes de coût global

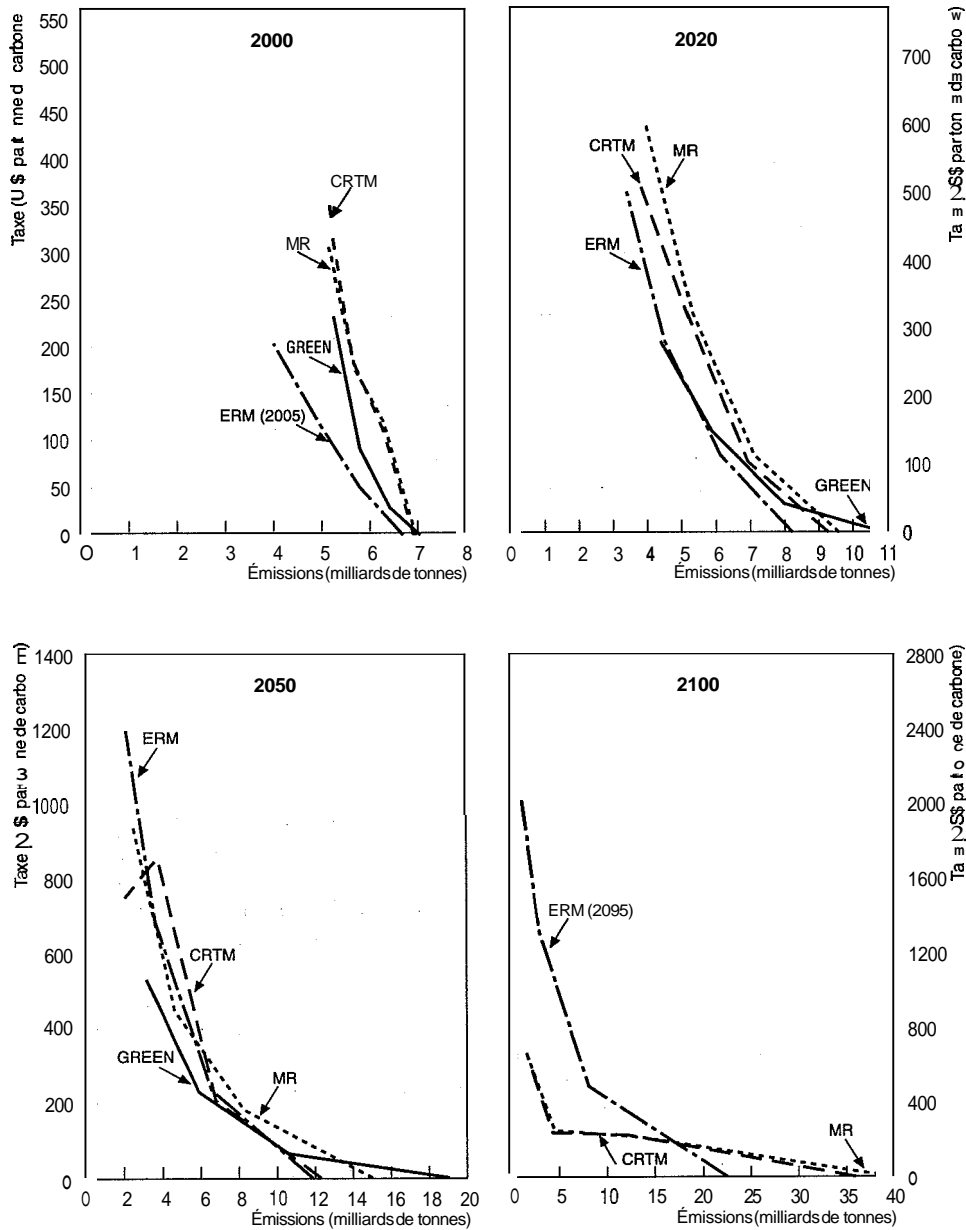
Le niveau auquel devraient se situer les **taxes sur le carbone** pour ramener les émissions de CO₂ à des niveaux donnés en milliards de tonnes de carbone est indiqué, dans le graphique 2, par une série de courbes montrant les taux d'imposition pour les années 2000, 2020, 2050 et 2100. Chaque courbe illustre, pour chaque modèle, les résultats des scénarios prévoyant une diminution des émissions de 1, 2 et 3 pour cent. Ces courbes du niveau global d'imposition sont établies à partir de la moyenne, pondérée par les émissions, des courbes d'imposition régionale. On notera que les points de départ correspondant à l'hypothèse de politiques inchangées, c'est-à-dire à la non-imposition des émissions, varient considérablement pour les périodes les plus éloignées, comme on l'a déjà vu dans la section précédente et comme le montre le graphique 1. Bien que ces courbes aient été établies à partir des scénarios prévoyant une réduction, en points de pourcentage, des taux d'accroissement des émissions, elles peuvent être interpolées pour obtenir les taux d'imposition requis pour atteindre un niveau donné d'émissions pour les années **considérées**. Les principales conclusions que l'on peut tirer des courbes d'imposition reproduites dans le graphique 2 sont les suivantes :

- Le tracé des courbes montre que plus la réduction voulue des unités de carbone émises est importante, plus le taux d'imposition doit augmenter. Le rendement marginal de la taxe est décroissant car les solutions les moins coûteuses permettant de réduire les émissions sont utilisées en premier, et il devient de plus en plus difficile de remplacer ou d'économiser les combustibles fossiles. De plus, il faudrait que les taxes sur le carbone soient très élevées pour éliminer les dernières unités de carbone émises, c'est-à-dire qu'il faudrait qu'elles se situent à une moyenne mondiale supérieure à 500 dollars la tonne (ce qui équivaldrait à une taxe de 60 dollars par baril de pétrole) en 2050 et en 2100.
- Les différents modèles donnent des courbes relativement semblables pour les niveaux mondiaux d'imposition durant les premières périodes considérées (2000 et 2020) mais ceci n'est plus le cas (noter les changements d'échelle dans le graphique 2) à partir du moment où les réductions d'émission sont plus importantes (en 2050 et 2100). Cela tient au fait que le modèle ERM n'envisageant pas de technologies de rechange, la progression de la taxe est illimitée. De ce fait, ce modèle aboutit, dès 2050, à des taxes supérieures à 1 000 dollars par tonne qui augmentent inexorablement par la suite pour atteindre plus de 2 000 dollars par tonne en 2100. Les technologies de rechange limitent la progression du niveau d'imposition dans les modèles CRTM, MR et GREEN du fait que leur adoption est elle-même favorisée par des taxes plus élevées⁸.

Le **coût économique** moyen de la réduction des émissions est étroitement lié au niveau de la taxe sur le carbone que cette réduction exige, sans toutefois qu'il y ait corrélation absolue entre eux du fait que de nombreux facteurs entrent en jeu. La meilleure façon d'évaluer ce coût serait de considérer un instrument de mesure du bien-être économique⁹, tel que la variation équivalente hicksienne¹⁰ calculée dans les modèles GREEN et WW. Cette donnée n'est toutefois pas disponible dans les autres

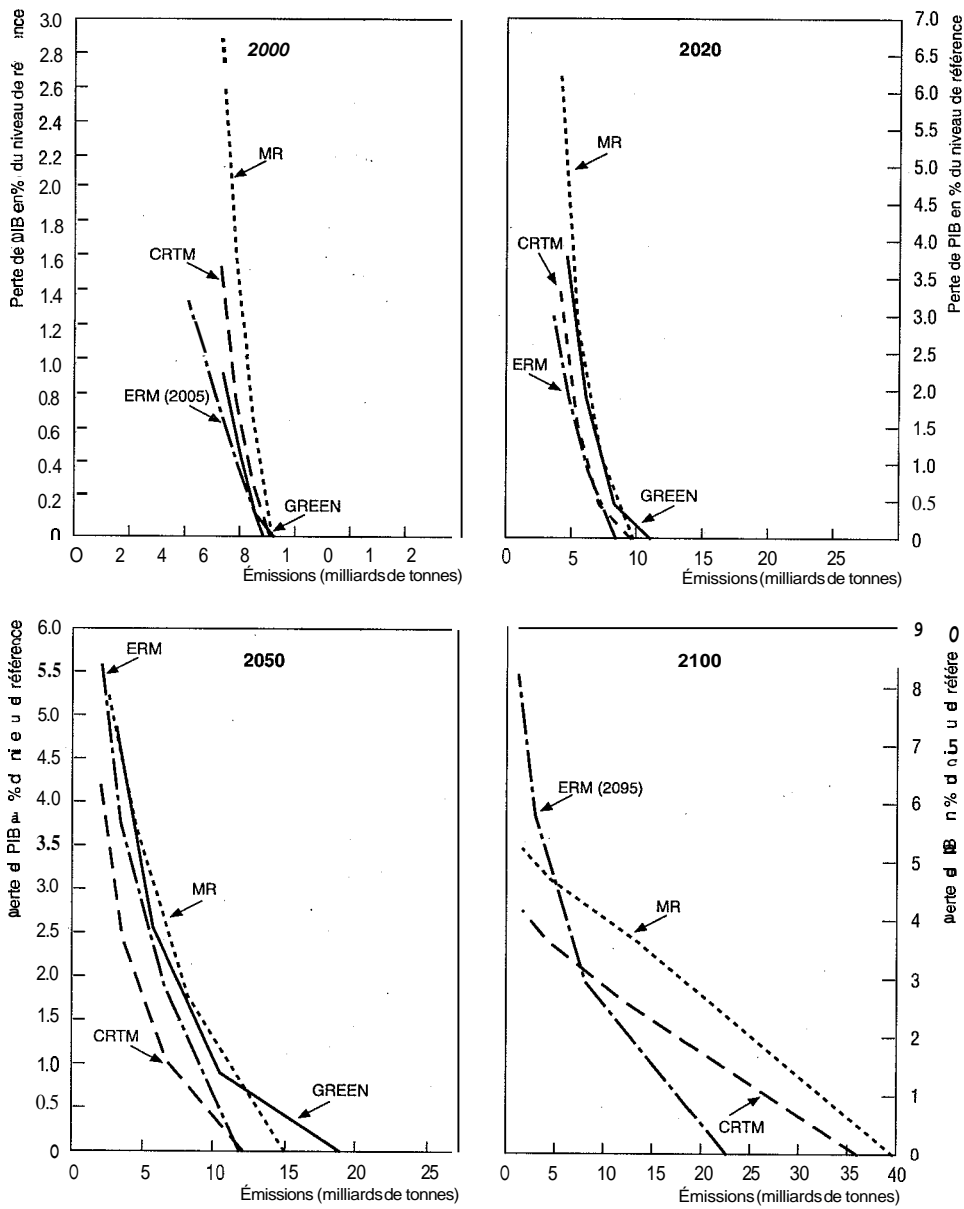
Graphique 2. Émissions mondiales et taxes sur le carbone

Note : Les échelles sont différentes pour les quatre graphiques.



Graphique 3. Émissions mondiales et pertes de PIB

Note : Les échelles sont différentes pour les quatre graphiques.



modèles qui ne mesurent que des grandeurs liées à l'aspect production, comme le PIB. Le PIB est certes un instrument de mesure courant de la production, mais il ne constitue qu'un indicateur partiel du bien-être du fait qu'il ne tient notamment pas compte de l'évolution des termes de l'échange (qui peut être particulièrement importante pour les pays producteurs de pétrole). Le graphique 3 illustre le coût de la lutte contre la pollution au moyen de courbes établies en fonction des pertes mondiales de PIB et des réductions d'émission en milliards de tonnes de carbone pour trois années déterminées, de la même manière que pour les courbes correspondantes d'imposition figurant dans le graphique 2.

Les pertes atteignent, pour commencer, en l'an **2000**, 1 à 3 pour cent du PIB dans le cas de la plus forte réduction des émissions (3 points par an) et sont au moins moitié moindres dans l'hypothèse d'une réduction de 2 pour cent. Cela reflète la pente ascendante des courbes d'imposition, ce qui confirme que la vitesse de l'ajustement constitue un facteur important. La fourchette des pertes de PIB se situe entre 3 et 6 pour cent et entre 4 et 8 pour cent en **2020** et **2100**, respectivement, dans le cas de la plus forte réduction des émissions (3 pour cent). C'est le modèle ERM qui indique la plus forte perte du fait à la fois qu'il envisage le plus haut niveau d'imposition (graphique 2) et qu'il fait apparaître une corrélation assez étroite entre les prix de l'énergie et le PIB, que même ses auteurs ont tendance à mettre en doute (Barns *et al.*, 1992).

B. Différents résultats régionaux suivant les modèles

Les taxes sur le carbone et les pertes de PIB qu'impliquerait le scénario de réduction de 2 pour cent sont indiquées pour les différentes régions dans les graphiques 4 et 5.

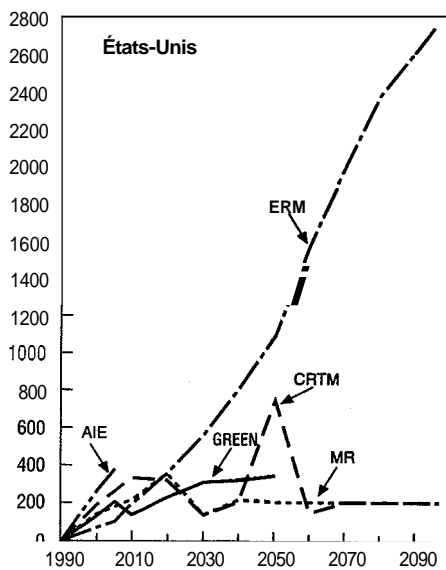
États-Unis. La plupart des modèles concordent relativement bien pour ce qui est du niveau de la taxe sur le carbone correspondant à des réductions allant jusqu'à 45 pour cent environ, chiffre qui est atteint, dans le scénario prévoyant des réductions de 2 pour cent par an, aux alentours de **2020** (graphique 4). Le modèle de l'AIE aboutit à des taxes sensiblement plus élevées que les autres modèles pendant les 15 premières années, parce qu'il est très tributaire des rigidités qui affectent actuellement le système énergétique (Vouyoukas, 1992). Au-delà de **2020**, les modèles CRTM, ERM et MR font apparaître des taxes à peu près identiques de l'ordre de 350 dollars par tonne de carbone pour une réduction de 45 pour cent, mais divergent ensuite dans des proportions énormes. La taxe nécessaire pour obtenir une réduction des émissions de référence de près de 90 pour cent à la fin du siècle prochain est d'un peu plus de 200 dollars dans les modèles CRTM et MR mais de près de 2 800 dollars dans le modèle ERM. Les deux premiers incorporent des technologies de rechange qui imposent une limite supérieure à la taxe sur le carbone, après un certain dépassement au départ, mais ces technologies de rechange n'existent pas dans le modèle ERM. Sans ces technologies, les taxes sur le carbone atteignent des niveaux extrêmement élevés, comme dans le modèle ERM, et la courbe type de la taxe fait apparaître des rendements décroissants, puisqu'elle s'élève assez rapidement, une fois que les substitutions les plus faciles entre combustibles ont été opérées.

Les résultats obtenus avec le modèle WW sont du même ordre que ceux des autres modèles pour des réductions d'environ 45 pour cent et se situent ensuite entre

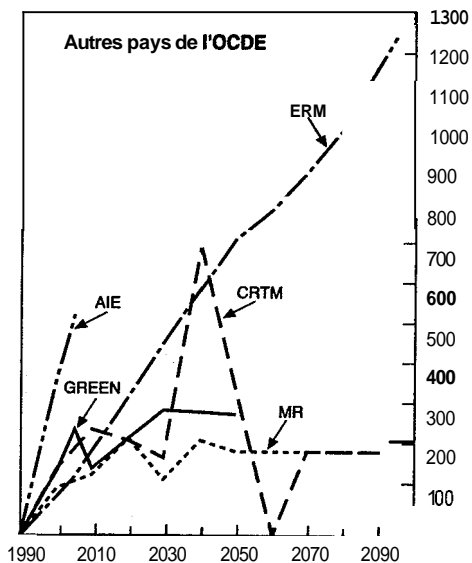
Graphique 4. Taxes sur le carbone dans l'hypothèse d'une réduction des émissions de 2 pour cent

Note : Les échelles sont différentes pour les quatre graphiques.

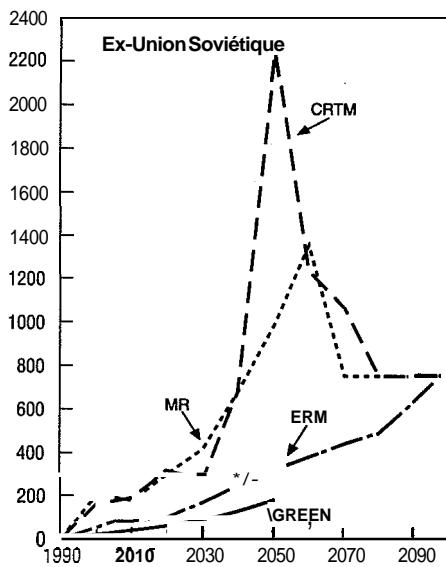
Taxe (US\$ par tonne de carbone)



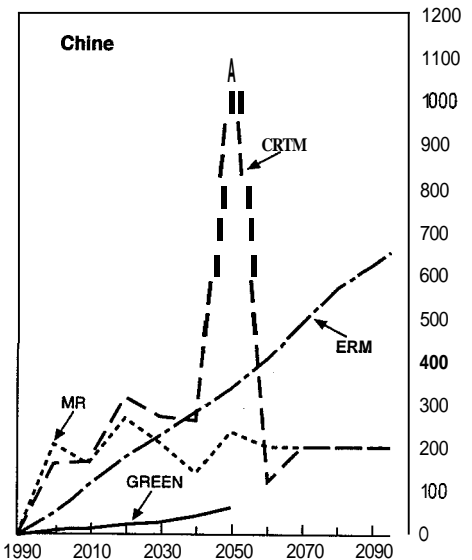
Taxe (US\$ par tonne de carbone)



Taxe (US\$ par tonne de carbone)

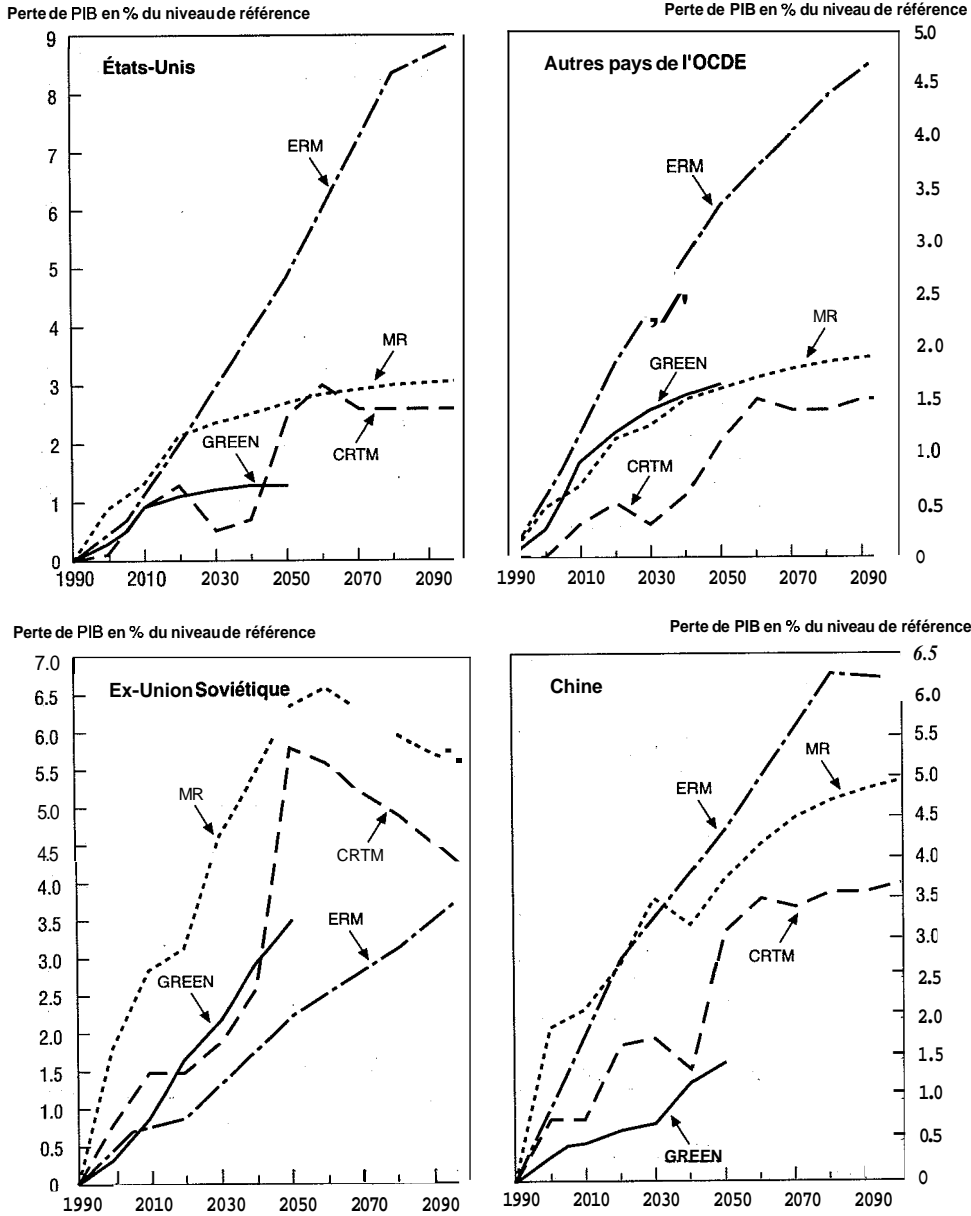


Taxe (US\$ par tonne de carbone)



Graphique 5. Pertes de PIB dans l'hypothèse d'une réduction des émissions de 2 pour cent

Note : Les échelles sont différentes pour les quatre graphiques.



le modèle ERM et les modèles CRTM/MR, en l'absence de technologies de rechange, si bien que la courbe de la taxe s'élève, comme avec le modèle ERM¹¹.

Pour ce qui est des coûts, on notera qu'ils sont beaucoup plus élevés avec le modèle WW, même avec une taxe du même ordre que dans les autres modèles. Dans une certaine mesure, cela était prévisible puisque, comme on l'a vu plus haut, ce modèle utilise un indicateur de bien-être qui va au-delà des simples pertes de production des autres modèles. Pour une contrainte d'environ 80 pour cent en dessous des niveaux de référence, la perte de bien-être serait nettement plus élevée (20 pour cent) que les estimations déjà élevées obtenues au moyen du modèle ERM.

Pour ce qui est des autres modèles figurant dans le graphique 5, les pertes de PIB des États-Unis sont plus faibles, sur la période allant jusqu'en 2050, dans GREEN et CRTM que dans ERM ou MR. Les résultats obtenus à l'aide de ces deux derniers modèles sont relativement proches les uns des autres jusqu'en 2020, avec des coûts d'environ 2 pour cent du PIB pour une réduction de 45 pour cent du niveau de référence des émissions, mais les estimations deviennent ensuite très divergentes. Dans le modèle MR, les coûts cessent d'augmenter après 2030, à mesure que des technologies de rechange entrent en jeu et que le taux d'imposition se stabilise à son niveau d'équilibre à long terme d'environ 200 dollars la tonne de carbone. Avec le modèle CRTM, les pertes de PIB vont même jusqu'à diminuer entre 2020 et 2040. Par contre, avec le modèle ERM, les coûts continuent d'augmenter fortement, à un rythme toutefois de moins en moins rapide, au-delà de 2065 (la courbe des coûts, dans le graphique 5, devient alors moins pentue). *A priori*, on se serait attendu à ce que la hausse des coûts, dans ce modèle, continue de s'accélérer parallèlement à celle de la taxe.

Autres pays de l'OCDE. Les résultats obtenus pour les autres pays de l'OCDE ne sont pas aussi concordants, pour les 30 premières années, que les résultats concernant les États-Unis. Il est vrai que les modèles CRTM, ERM, GREEN et MR sont relativement concordants pour la période allant jusqu'à 2005, et ne divergent pas trop jusqu'en 2020. Ensuite, en revanche, leurs résultats deviennent très divergents, pour la même raison apparente que précédemment, à savoir l'incidence des technologies de rechange dans les modèles MR, GREEN et CRTM, et leur absence dans le modèle ERM, qui entraîne une augmentation infinie de la taxe. Dans le modèle CRTM, la taxe est beaucoup plus variable, mais finit par s'établir au niveau de 208 dollars la tonne, déterminé par l'existence de technologies de rechange. La taxe sur le carbone, dans le modèle de l'AIE, est une fois encore beaucoup plus élevée que dans tous les autres modèles.

Pour ce qui est des coûts (graphique 5), les résultats des modèles ERM et MR font apparaître une «équivalence» approximative des coûts et des taxes entre les autres pays de l'OCDE et les États-Unis. Le modèle MR aboutit à peu près à la même taxe, mais avec des coûts un peu plus élevés dans le cas des États-Unis, tandis qu'avec le modèle ERM, les coûts pour les autres pays de l'OCDE sont inférieurs de moitié environ à ceux qui se rapportent aux États-Unis, pour une taxe qui est aussi à peu près inférieure de moitié. Les résultats du modèle GREEN pour les autres pays de l'OCDE sont très comparables à ceux du modèle MR, tandis que c'est le modèle CRTM qui aboutit aux plus faibles pertes de PIB.

Ex-Union Soviétique. Les taxes calculées au moyen des modèles ERM et GREEN sont identiques aux alentours de 2020, la courbe d'imposition du modèle ERM

indiquant des rendements décroissants jusqu'à la fin du siècle et ayant à peu près le même profil que pour les autres régions. Avec le modèle MR, en revanche, la taxe est Uniformément plus élevée dans tous les cas, même avec les technologies de rechange, qui stabilisent la taxe aux alentours de 750 dollars la tonne à partir de 2070. Le modèle CRTM, qui aboutit au même taux d'imposition de 750 dollars, conduit à un dépassement de ce montant dans des proportions énormes, au milieu du XXI^e siècle, la taxe dépassant 2 000 dollars par tonne. Dans le modèle MR, la taxe d'équilibre à long terme est déterminée par la relation entre le coût relatif des combustibles de synthèse et des technologies de rechange exemptes de carbone et les prix des combustibles fossiles¹².

Les courbes de coûts (graphique 5) ont tendance à suivre les courbes d'imposition (graphique 4) d'assez près. Toutefois, il existe une différence relativement importante entre le modèle ERM et le modèle MR en ce qui concerne les coûts de production en 2100, alors que les taxes sur le carbone sont très comparables. Avec le modèle ERM, la courbe d'imposition rattrape progressivement le niveau du modèle MR vers la fin de la période (graphique 4), mais la perte de PIB reste nettement moins importante.

Chine. Il existe des similitudes entre les résultats concernant la Chine et ceux qui se rapportent à l'ex-Union Soviétique dans les quatre modèles examinés. Les modèles MR et CRTM s'écartent une fois encore de la « moyenne » plus rapidement, avec des taux d'imposition plus élevés que les autres modèles à court et moyen terme, mais les technologies de rechange interviennent plus rapidement et à un même taux d'imposition (un peu plus de 200 dollars) que dans les pays de l'OCDE. Avec le modèle CRTM, la taxe dépasse encore très largement ce niveau, avec plus de 1 000 dollars en 2050. Avec le modèle GREEN, la taxe nécessaire est beaucoup plus faible qu'avec les deux autres modèles. La courbe d'imposition du modèle ERM a une forme caractéristique, mais le point le plus intéressant est le profil plat de la courbe d'imposition du modèle GREEN. Le très faible niveau des prix intérieurs de l'énergie en Chine (par rapport aux prix internationaux), pour le charbon en particulier, est l'un des principaux facteurs qui expliquent cette courbe d'imposition très plate, et c'est d'ailleurs l'un des facteurs sur lesquels on mettra l'accent ci-après pour essayer d'expliquer les différences entre les résultats.

Pour la Chine comme pour l'ex-Union Soviétique, les coûts reflètent d'assez près les différentes courbes d'imposition, le modèle GREEN donnant des coûts aussi bien que des taxes très faibles et les modèles ERM et MR mettant en évidence un recouplement des courbes d'imposition et des courbes de coûts une fois que les réductions atteignent 50 pour cent par rapport aux niveaux de référence (vers 2025). Les coûts calculés au moyen des modèles ERM et MR étant assez proches les uns des autres en 2100, on peut encore penser que les dates des augmentations de la taxe ont une forte influence sur le coût en fin de période.

Reste du monde. Le « reste du monde » est un groupe relativement hétérogène dans la plupart des modèles, et il serait donc probablement imprudent de chercher à tirer des conclusions des comparaisons. À titre indicatif, cependant, on signalera que la courbe d'imposition du modèle ERM est caractéristique de ce modèle, puisqu'elle fait apparaître des rendements décroissants. Avec le modèle MR, la courbe d'imposition est plus pentue au départ, mais oscille ensuite de façon assez curieuse avant de baisser pour se rapprocher du coût des technologies de rechange. Les coûts finissent par être assez voisins en 2100, malgré un taux d'imposition, dans le modèle ERM, qui atteint au bout du compte un niveau à peu près dix fois plus élevé, et bien que les

coûts, dans le modèle MR, soient sensiblement plus élevés pendant toute la période précédant cette date. Les pertes de PIB, dans les années extrêmes au moins, sont plus proches qu'on aurait pu le penser étant donné les divergences souvent importantes des courbes d'imposition.

C. Analyse des différences : importance de la substitution

Les élasticités de substitution entre combustibles et entre l'énergie et les autres intrants jouent un rôle important dans le calcul du coût moyen et du coût marginal de la réduction des émissions. En général, les élasticités de substitution ne varient pas d'une région à l'autre au sein de chaque modèle mais elles diffèrent considérablement d'un modèle à l'autre. Par exemple, le modèle de l'AIE donne d'assez faibles élasticités de substitution entre combustibles du fait qu'il est **axé** sur le court terme, alors que le modèle WW ne fait pas de distinction entre les combustibles fossiles et table sur une forte élasticité de substitution entre les sources d'énergie fossiles et non fossiles.

Les scénarios de référence variant considérablement en ce qui concerne les prix de l'énergie et la nature des combustibles, il est impossible d'évaluer isolément l'effet des élasticités de substitution sur les résultats des simulations. Les prix des combustibles pratiqués dans les différentes régions influenceront de manière déterminante sur la façon dont un taux donné d'imposition favorisera la substitution entre sources d'énergie tandis que la répartition entre les combustibles conditionnera les possibilités de changement en faveur d'options moins polluantes.

On peut se faire une idée de l'importance relative des effets des économies d'énergie et de la substitution entre sources d'énergie en procédant au même genre de ventilation que celle qui a été utilisée plus haut pour examiner les scénarios de référence.

Le tableau 6 donne les résultats de cette ventilation pour l'année 2020 dans l'hypothèse d'une réduction de 2 pour cent des émissions. Pour les régions de l'OCDE, c'est le modèle de l'AIE qui attribue le plus faible rôle à la substitution entre combustibles dans la réduction des émissions mais il est à noter que les chiffres indiqués correspondent, pour ce modèle, à l'année 2005 et que l'on peut penser que le phénomène de substitution s'intensifiera avec le temps. Ce faible degré de substitution en faveur de combustibles moins polluants explique essentiellement pourquoi ce modèle donne les taux d'imposition les plus élevés pour les régions de l'OCDE. Selon le modèle de l'AIE, la diminution des émissions résultera, pour près des trois quarts, d'une forte baisse de l'intensité énergétique, la production demeurant inchangée par hypothèse. Les modèles **ERM** et MR font jouer un rôle beaucoup moins important à la modification de l'intensité énergétique (mais sur une période plus longue). En particulier, celle-ci ne contribuerait guère à la réduction des émissions en Chine et dans l'ex-Union Soviétique, d'après le modèle ERM, sa contribution serait aussi assez faible avec le modèle MR. Par contre, tous les modèles attribuent un rôle relativement important aux économies d'énergie dans le reste du monde, du fait de la faible part du charbon (dans une région qui regroupe les principaux pays en développement producteurs de pétrole) et donc de possibilités de changements assez réduites en faveur de combustibles beaucoup moins polluants.

Tableau 6. Décomposition de l'évolution des émissions

Contributions en pourcentage à l'évolution des émissions en 2020 par rapport au scénario de référence dans l'hypothèse d'une réduction (annuelle) de 2 points de pourcentage

	Évolution de				Pour mémoire : Taxe sur le carbone \$ par tonne
	substitution entre combustibles		l'intensité énergétique	la production	
	la teneur en carbone des combustibles fossiles ¹	la part des combustibles exempts de carbone			
ERM					
États-Unis	20	44	33	3	351
Autres pays de l'OCDE	19	49	30	3	342
Ex-Union soviétique	63	16	19	2	104
Chine	41	32	22	5	182
Reste du monde	-2	60	39	3	430
GREEN					
Etats-Unis	13	14	71	2	223
Autres pays de l'OCDE	19	24	55	2	239
Ex-Union soviétique	10	4	84	2	69
Chine	15	1	84	1	26
Reste du monde	8	6	80	6	184
AIE²					
Amérique du Nord	12	13	75 ³		376
Autres pays de l'OCDE	10	19	72 ³		548
MR					
États-Unis	20	32	45	4	354
Autres pays de l'OCDE	18	45	35	2	241
Ex-Union soviétique	30	37	28	5	301
Chine	10	54	30	5	271
Reste du monde	29	24	39	8	399

1. Y compris les combustibles de synthèse à base de carbone.

2. Les chiffres concernent l'année 2005; les émissions sont inférieures de 25 pour cent au niveau de référence contre 45 pour cent dans le cas des simulations des autres modèles.

3. Contribution à l'évolution énergétique globale.

D'après les modèles ERM et MR, la substitution entre combustibles est très importante et contribue pour plus de 50 pour cent à la baisse des émissions en intervenant surtout entre combustibles à base de carbone et exempts de carbone plutôt qu'entre combustibles carbonés. Le modèle GREEN lui accorde aussi un rôle important dans les régions de l'OCDE où sa contribution à la réduction des émissions devrait se situer entre 25 et 50 pour cent, mais non dans les autres régions, où elle serait relativement minime. L'incidence de l'évolution de la production sur les émissions est faible dans tous les modèles considérés dans le tableau 6.

Les résultats donnés pour l'ex-Union Soviétique et la Chine par le modèle GREEN –faible substitution, très importantes économies d'énergie et faibles taux d'imposition – peuvent s'expliquer par les prix initiaux et le prix des technologies de rechange retenus dans ce modèle. Les prix des combustibles fossiles dans ces régions, et du charbon en particulier, étant relativement bas au départ, les taxes sur le carbone ont un plus fort

impact que dans les autres régions. De plus, les prix n'atteignent pas des niveaux suffisamment élevés pour favoriser l'adoption de technologies de rechange exemptes ou non de carbone (combustibles de synthèse). La situation que décrit le modèle GREEN en ce qui concerne le changement en faveur de combustibles exempts de carbone dans les différentes régions est instructive (voir la deuxième colonne du tableau 6). Si les hausses de prix entraînées par la taxe favorisent l'utilisation de technologies de rechange exemptes de carbone dans les régions de l'OCDE (surtout dans les « autres pays de l'OCDE ») avec le passage rapide du Japon, où les prix de l'énergie sont déjà élevés, à la production d'électricité sans production de carbone, les prix n'atteignent jamais un niveau assez élevé dans l'ex-Union Soviétique et la Chine pour y provoquer de tels changements. Sous l'effet de l'interaction entre le niveau relativement faible des prix de l'énergie dans ces deux derniers pays (par rapport aux autres régions ou aux autres modèles) et le niveau relativement élevé des prix que tous les modèles attribuent aux technologies de rechange, les économies d'énergie contribuent davantage à la réduction des émissions dans le modèle GREEN que dans les modèles ERM ou **MR**, surtout dans le cas des pays non membres de l'OCDE. La substitution entre sources d'énergie s'accroît après 2020, tous les modèles prévoyant une intensification du rôle des technologies de rechange. D'après le modèle GREEN, par exemple, elle devrait contribuer pour plus de la moitié à la réduction des émissions dans la zone de l'OCDE en 2050, grâce notamment à l'utilisation de combustibles exempts de carbone, les économies d'énergie continuant toutefois de jouer un rôle très important dans les autres régions. Avec le modèle MR, l'existence de technologies de rechange provoque un passage encore plus net à des combustibles exempts de carbone (sauf dans l'ex-Union Soviétique), plus des deux-tiers de la réduction des émissions en 2050 étant dus à ce processus. Dans le modèle ERM, ce changement est aussi très important pour les pays de l'OCDE, mais moins pour les autres pays. Dans tous les modèles, les économies d'énergie perdent de leur importance relative au fil des ans, à mesure que la substitution entre combustibles devient le principal facteur, la baisse de la production ne contribuant que de façon limitée à la réduction des émissions.

D. Stabilisation **des** émissions

Le scénario de stabilisation des émissions a un caractère différent de celui des autres scénarios de réduction. La stabilisation des émissions dans chaque région à leur niveau de 1990 constitue un objectif absolu, si bien que les taxes sur le carbone nécessaires et les coûts en résultant sont très largement fonction du niveau des émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées. En principe, on pourrait effectivement obtenir des résultats à partir de l'analyse des scénarios reposant sur l'hypothèse de politiques inchangées (section II) et à partir des scénarios de réduction des émissions examinés plus haut, d'importantes réductions (équivalentes à celles des scénarios à 2 ou 3 pour cent) étant requises dans la plupart des modèles pour la Chine et le reste du monde afin de stabiliser les émissions, et des réductions moins importantes (équivalentes au scénario à 1 pour cent) étant requises pour les régions de l'OCDE et l'ex-Union Soviétique. Les scénarios reposant sur l'hypothèse de politiques inchangées (graphique 1) nous apprennent que l'ampleur des réductions nécessaires pour assurer la Stabilisation sera particulièrement grande dans les modèles WW, puis

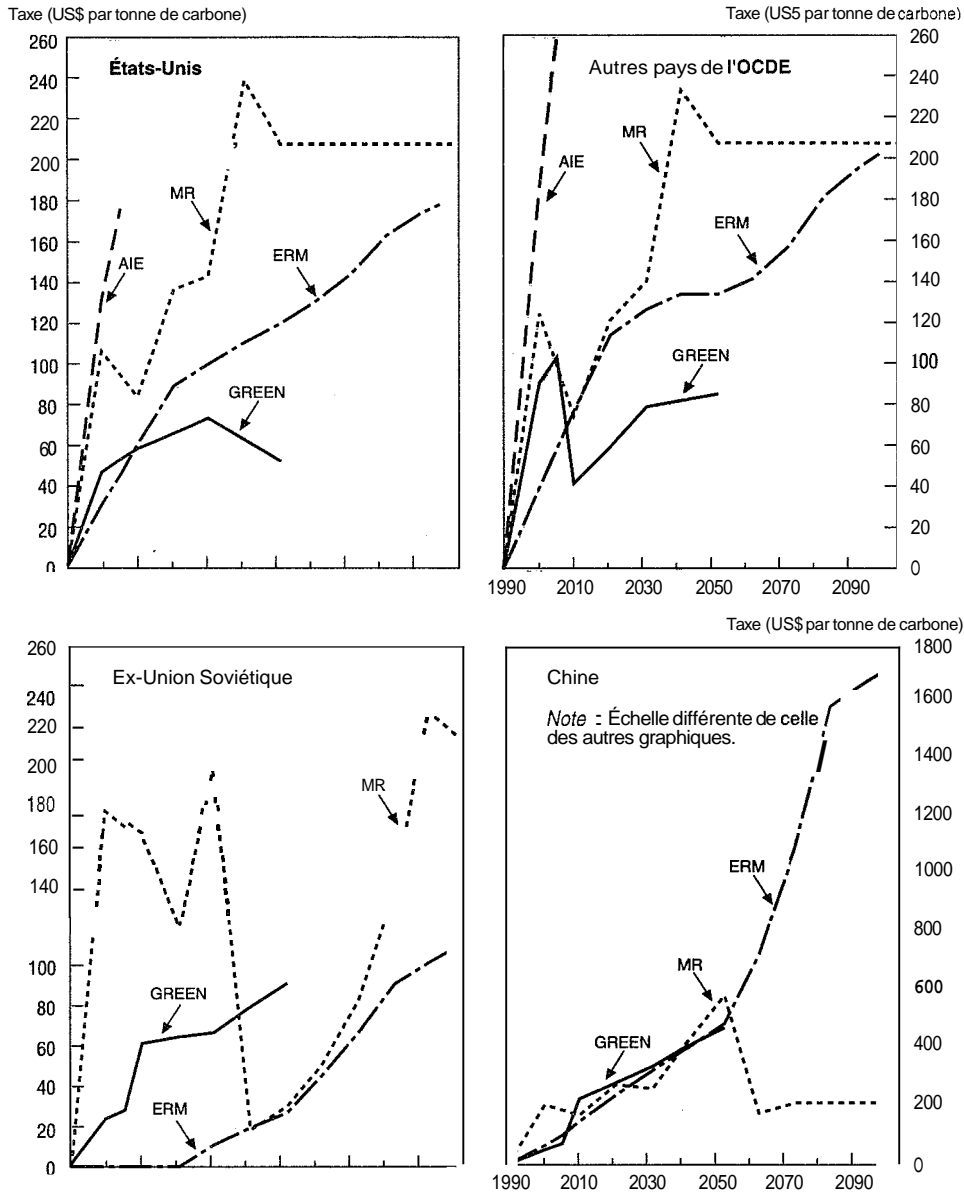
GREEN et dans celui de l'AIE, tandis qu'elle sera plus faible avec le modèle ERM. Pour établir des comparaisons entre modèles, il convient de tenir compte des différents profils d'émission dans l'hypothèse de politiques inchangées et donc de l'importance des réductions.

L'intérêt du scénario de stabilisation tient au fait que la Convention sur le changement climatique signée à Rio en juin 1992, fixe, pour les pays développés, un objectif de stabilisation de toutes les émissions de gaz à effet de serre à leur niveau de 1990. Aucun engagement ferme n'a été pris, mais une bonne partie des débats qui ont eu lieu lors des négociations internationales précédant la signature ont tourné autour d'un objectif de stabilisation. Il est toutefois difficile de dire si l'on a pleinement tenu compte du degré d'incertitude concernant à la fois les profils d'émission dans l'hypothèse de politiques inchangées et les coûts du maintien des émissions de CO₂ à leur niveau de 1990.

Les principaux résultats de ces scénarios sont présentés dans les graphiques 6 et 7. Plusieurs tendances générales se dégagent :

- i) La taxe sur le carbone, pour les **régions de l'OCDE**, atteint un maximum dans le modèle de l'AIE et un minimum dans le modèle GREEN à partir de 2010. Le résultat auquel aboutit le modèle de l'AIE était prévisible; l'augmentation des émissions est relativement rapide et les scénarios de réduction se soldent par des impôts plus élevés qu'ailleurs pour toute réduction donnée. Les résultats du modèle ERM, qui se trouve dans une position intermédiaire, ne sont pas surprenants non plus; la taxe requise est plus élevée durant les années extrêmes que dans les autres modèles, mais l'augmentation des émissions est beaucoup plus lente. Dans le modèle GREEN, le niveau relativement bas de la taxe tient à deux facteurs : premièrement, l'augmentation des émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées pour les régions de l'OCDE est relativement faible, même si les émissions mondiales augmentent beaucoup plus rapidement que dans les autres modèles, et, deuxièmement, les technologies de rechange commencent à devenir importantes à partir de 2010, en raison des hypothèses retenues concernant les coûts et les différences des prix relatifs de l'énergie durant l'année de référence suivant les pays de l'OCDE. Les résultats des modèles CRTM et MR se situent entre les extrêmes mais accusent de fortes fluctuations avant de se stabiliser à un taux d'imposition déterminé par les technologies de rechange (208 dollars la tonne) pendant la deuxième moitié du siècle prochain.
- ii) Pour les **régions n'appartenant pas à la zone de l'OCDE**, l'un des principaux points est l'instabilité des profils d'évolution de la taxe, en particulier avec les modèles CRTM et MR dans le cas de l'ex-Union soviétique et, dans une moindre mesure, dans celui de la Chine. Pour l'ex-Union Soviétique, cela tient au ralentissement de la croissance des émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées, puis à leur diminution en termes absolus, pendant la première moitié du prochain siècle et, pour la Chine, au prix des technologies de rechange et au passage à une taxe d'équilibre de 208 dollars la tonne de carbone en 2080. Les courbes d'imposition, dans les modèles GREEN et ERM, sont plus lisses et d'ailleurs assez comparables dans le cas de la Chine, bien qu'avec le modèle ERM, la taxe accuse de façon typique une très forte augmentation.

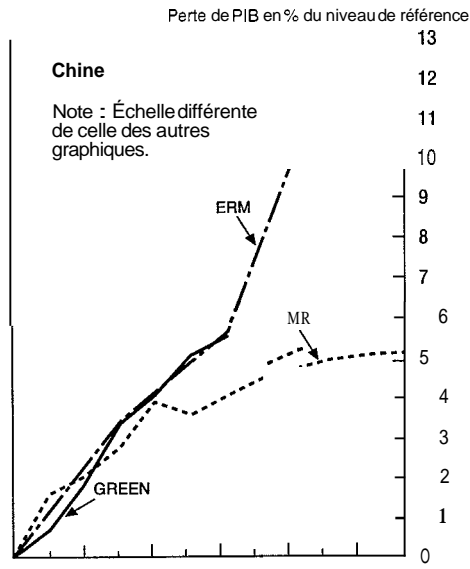
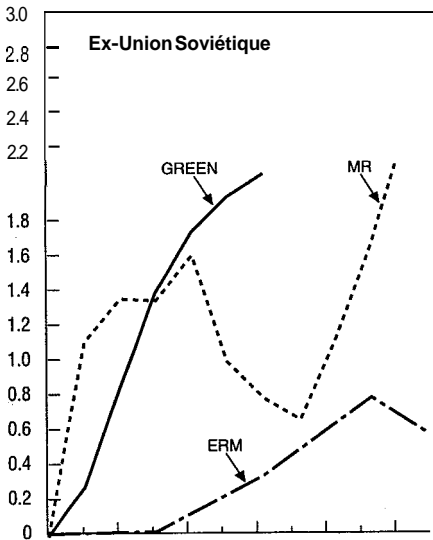
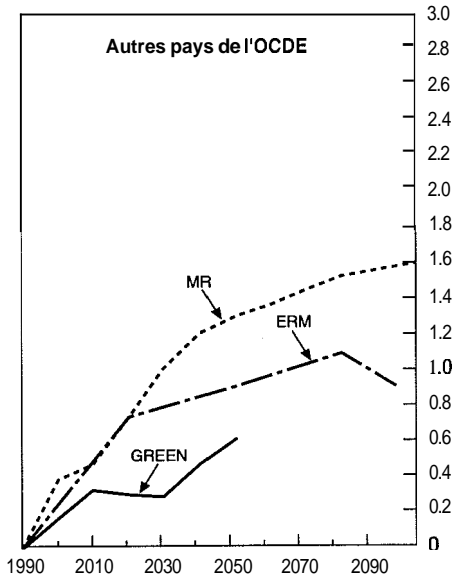
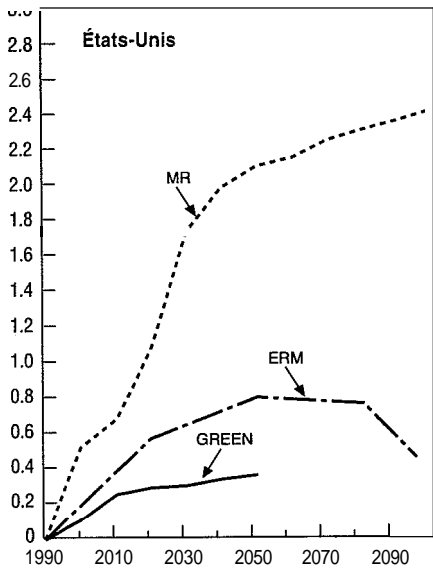
Graphique 6. Taxes sur le carbone dans l'hypothèse d'une stabilisation des émissions



Note : Le modèle CRTM a été exclu parce que la série est très irrégulière et a tendance à voiler les autres séries ; il aboutit toutefois au même niveau en fin de période que le modèle MR.

Graphique 7. Pertes de PIB dans l'hypothèse d'une stabilisation des émissions

Perte de PIB en % du niveau de référence



Note : Le modèle CRTM a été exclu parce que la série est très irrégulière et a tendance à voiler les autres séries ; il aboutit toutefois au même niveau en fin de période que le modèle MR.

- iii)* Les **pertes de PIB** liées au scénario de stabilisation sont relativement faibles dans le cas des régions de l'OCDE et de l'ex-Union Soviétique mais très importantes dans celui de la Chine et du reste du monde. Ces coûts reflètent généralement de façon assez étroite les taux d'imposition requis. Si les taxes et les coûts sont beaucoup plus élevés pour la Chine et le reste du monde, c'est parce que la croissance des émissions dans l'hypothèse de politiques inchangées est très rapide et que les réductions nécessaires sont très importantes. Naturellement, la réalité politique est que ces régions n'accepteraient pas d'objectif de stabilisation, du moins sans transferts compensatoires massifs de la part des autres pays.
- iv)* **Les technologies de recharge**, dans les modèles CRTM, GREEN et MR, limitent l'augmentation de la taxe sur le carbone et des pertes de PIB dues à la stabilisation des émissions, sauf dans le cas de l'ex-Union Soviétique, où l'augmentation des émissions est de toute façon assez faible.

IV. EFFICACITÉ DES RÉDUCTIONS D'ÉMISSIONS PAR RAPPORT A LEURS COÛTS

Étant donné la diversité inter-régionale des taux d'imposition et des coûts de la lutte contre la pollution, dans les différents scénarios, on peut penser qu'il devrait être possible de réduire le coût mondial de la réduction des émissions. Si (comme le montrent les taux de la taxe sur le carbone) il est à la marge plus coûteux pour une région que pour une autre d'atteindre l'objectif de réduction des émissions, il devrait être possible, en principe, de procéder à une redistribution inter-régionale des réductions nécessaires, qui soit profitable aux régions concernées, associée à des paiements inter-régionaux. Pour assurer globalement l'efficacité des réductions d'émissions par rapport à leurs coûts, il faudrait égaliser entre les régions les coûts marginaux de la lutte contre la pollution, tels qu'ils ressortent des taxes régionales sur le carbone. Tous les modèles montrent que des réductions équi-proportionnelles des émissions sont incompatibles avec cette égalisation. Un système d'échange de droits d'émission entre les pays ou les régions, ou une taxe mondiale sur le carbone, permettraient de concentrer les réductions d'émissions là où elles sont les moins coûteuses. S'ils étaient réalisables, de tels échanges permettraient de répartir plus efficacement les réductions d'émissions entre les régions en laissant les pays échanger leurs droits d'émission jusqu'au point où les taxes sur le carbone seraient les mêmes partout. Une taxe mondiale sur le carbone aboutirait aussi à égaliser le coût marginal de la réduction des émissions entre les pays.

Trois des modèles faisant l'objet de l'étude comparative (ERM, GREEN et MR) envisagent un scénario prévoyant l'échange de droits d'émission. Les résultats obtenus sur cette base sont reproduits dans le tableau 7 pour les années 2020, 2050 et 2100, dans l'hypothèse d'une réduction des émissions de 2 pour cent. Les gains les plus importants sont réalisés dans le modèle GREEN : la perte globale de production

Tableau 7. Différences de coût liées aux échanges de droits d'émission

Les chiffres correspondent à une réduction des émissions de 2 points de pourcentage par rapport au niveau de référence et sont des totaux mondiaux

		ERM ¹		GREEN		MR	
		Taxe (\$/tC)	Perte de PIB (%)	Taxe (\$/tC)	Perte de PIB (%)	Taxe (\$/tC)	Perte de bien-être ²
2020	Absence d'échanges	283	1.9	149	1.9	325	
	Échanges	238	1.6	106	1.0	308	
2050	Absence d'échanges	680	3.7	230	2.6	448	
	Échanges	498	3.3	182	1.9	374	
2100	Absence d'échanges	1 304	5.7			242	8.0
	Échanges	919	5.1			208	7.5

diminue de moitié et tombe de 2 à 1 pour cent du **PIB** en 2020, lorsque les plus fortes réductions des émissions interviennent dans les régions **où** elles sont le moins coûteuses. Tous les modèles montrent que de tels échanges auraient un effet positif. Celui-ci est toutefois moindre dans les modèles qui prévoient une plus faible dispersion des taxes sur le carbone en l'absence d'échange de droits d'émission (**ERM** et **MR**, par exemple). De plus, la dispersion des taxes diminue au fur et à mesure que des technologies de recharge entrent en jeu, réduisant en conséquence les gains provenant de l'échange des droits d'émission. C'est ainsi qu'avec le modèle **GREEN**, ils sont moins importants en 2050 qu'en 2020. Les sommes concernées dans les échanges de droits d'émission ne sont pas négligeables. Pour l'année 2050, elles vont de 200 milliards de dollars avec le modèle **GREEN** à plus de **400** milliards avec le modèle **MR**, dans lequel elles diminuent par la suite, l'emploi de technologies de recharge réduisant la dispersion des taxes et donc les gains susceptibles de résulter des échanges de droits. Cela fait une nouvelle fois ressortir l'importance capitale des hypothèses concernant les technologies de recharge pour tous les aspects de l'évaluation des taxes et des coûts, ainsi que des gains qui pourraient résulter d'accords permettant d'atteindre les objectifs fixés au moindre coût.

NOTES

1. Le projet de l'OCDE a été mené parallèlement et en étroite collaboration avec un exercice analogue, mais plus complet, réalisé par l'Energy Modelling Forum de l'Université de Stanford. Ce projet, désigné sous le nom d'EMF12, porte sur un plus grand nombre de modèles (notamment des modèles nationaux des États-Unis) et met davantage l'accent sur les diverses émissions du secteur énergétique, tandis que le projet de l'OCDE se limite à des modèles **globaux** et se concentre sur les coûts macro-économiques. L'OCDE tient à remercier les responsables d'EMF12 pour leur concours en ce qui concerne la normalisation des intrants, les ventilations régionales et d'autres aspects de la conception du projet. Les résultats définitifs du projet EMF12 seront publiés en 1993.
2. Les technologies de rechange sont des technologies nouvelles ou expérimentales qui devraient devenir disponibles en quantités abondantes (sans contrainte de ressources naturelles) à l'avenir.
3. Les données relatives aux émissions de CO₂ sont calculées de diverses manières, mais s'appuient principalement sur l'application de coefficients d'émission de carbone aux données relatives aux différents combustibles. Les chiffres obtenus sont des estimations qui sont souvent fondées sur des données peu fiables, si bien que des différences dans les données de référence ne sont pas surprenantes. De plus, les données relatives à 1990 pour les émissions mondiales ne sont pas encore disponibles et les modélisateurs sont donc obligés d'utiliser d'autres années de référence pour faire des estimations pour 1990. L'IPCC, conjointement avec l'OCDE/AIE, travaille à la mise au point de données plus fiables sur les émissions et l'absorption de gaz à effet de serre. Sa dernière estimation des émissions de carbone liées à l'utilisation d'énergie en 1990 est de 6 milliards de tonnes.
4. Le résultat très élevé mentionné plus haut pour le modèle WW (65% milliards de tonnes en 2100) s'explique par l'hypothèse d'une AEEI nulle.
5. Le manuel technique du modèle GREEN, qui comprend une analyse des paramètres utilisés dans différents modèles, ne donne guère d'informations sur l'AEEI; cf. Burniaux *et al.* (1992).
6. Les coefficients d'émission sont les mêmes pour tous les modèles en ce qui concerne le gaz. Pour le pétrole et les produits pétroliers, ils accusent un écart de 6 pour cent entre les modèles. Pour le charbon, les différences sont encore plus importantes. De plus, les modèles CRTM, GREEN et MR comportent une technologie de rechange, à savoir les combustibles de synthèse, dont le coefficient d'émission est deux fois plus élevé que celui du pétrole. Le modèle ERM comporte aussi une source supplémentaire d'énergie pour l'avenir, à savoir l'exploitation de formations carbonées, dont le coefficient d'émission est un peu plus élevé que celui du charbon. Les différences de coefficient d'émission reflètent les incertitudes concernant les taux d'émission moyens pour des ensembles comprenant des produits énergétiques hétérogènes.
7. Il est difficile de comparer le niveau de référence du modèle WW avec ceux des autres modèles car il concerne des valeurs moyennes pour la période 1990-2100. Toutefois, la part

en valeur des produits énergétiques à base de carbone dans le PIB, de l'ordre de 10 pour cent en moyenne sur la période 1990-2100, est élevée, en raison de l'absence de toute amélioration du rendement énergétique, de l'inexistence de technologies de rechange exemptes de carbone et de l'offre limitée de combustibles non fossiles. Tous ces facteurs contribuent à des niveaux d'émission beaucoup plus élevés que dans les autres modèles.

8. Dans les modèles CRTM et MR, les technologies de rechange limitent la taxe à un peu plus de 200 dollars par tonne dans toutes les régions sauf l'ex-Union Soviétique, cette exception signifiant que la moyenne mondiale de la taxe continuerait de progresser fortement en 2100 si l'on devait continuer de réduire les émissions. Dans le modèle GREEN, le niveau auquel intervient le recours aux technologies de rechange est fonction du prix initial des différents combustibles. Cela est particulièrement important pour les régions extérieures à la zone de l'OCDE parce que les prix des produits énergétiques y étant souvent inférieurs au départ aux prix mondiaux, les taxes doivent y atteindre des niveaux plus élevés qu'ailleurs avant que les technologies de rechange ne deviennent compétitives.
9. Dans le contexte de ce projet d'étude comparative, qui est axé sur le coût des mesures destinées à ralentir le changement climatique et ne tient pas compte de leurs avantages (en termes de dommages évités), la variation du bien-être n'est mesurée que du point de vue des coûts; si l'on prenait en considération les avantages, on obtiendrait une mesure globale des effets des changements de politique énergétique sur le bien-être qui permettrait d'évaluer le niveau optimal de réduction des émissions.
10. La variation équivalente hicksienne correspond à l'accroissement de revenu dont chaque consommateur devrait bénéficier après l'introduction d'une taxe sur le carbone pour lui permettre de retrouver le même niveau de bien-être qu'avant l'adoption de la taxe.
11. Il est possible d'établir une courbe d'imposition avec le modèle WW pour la période 1990-2100, mais celle-ci représenterait non pas un profil temporel dynamique mais le niveau requis de la taxe sur le carbone suivant le degré de réduction des émissions, les réductions elles-mêmes étant celles qu'impliquent les scénarios à 1, 2 et 3 pour cent. Une telle courbe n'a pas été présentée ici; la totalité des résultats obtenus à l'aide du modèle WW et des autres modèles figure dans les six documents de travail énumérés en bas du tableau 1.
12. Le niveau d'équilibre à long terme de la taxe (T_c) est déterminé, dans le modèle MR, par le rapport entre le coût relatif des combustibles de rechange exempts de carbone (P_{BS}) et du gaz dont le coût est élevé (P_G) d'une part, et la différence de teneur en carbone des combustibles, d'autre part (α) ou $(P_{BS}-P_G)/\alpha = T_c$, les prix étant exprimés en dollars par gigajoule d'équivalent pétrole et la teneur en carbone par le nombre de tonnes de carbone par gigajoule d'équivalent pétrole; cela donne 758 dollars par tonne de carbone : $(16.667-6.25)/(0.01374)$. Pour l'ex-Union Soviétique le niveau d'équilibre à long terme de la taxe sur le carbone est plus élevé que pour les autres régions, parce qu'on suppose que des réserves de gaz beaucoup plus abondantes sont disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

- Barns, D.W., J.A. Edmonds et J.M. Reilly (1992), « Use of the Edmonds-Reilly Model to model energy-related greenhouse gas emissions », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 113 (avril).
- Boero, G., R. Clarke et L.A. Winters (1991), « The macroeconomic consequences of controlling greenhouse gases : a survey », Department of the Environment, *Environmental Economics Research Series*, HMSO, Londres.
- Burniaux, J.-M., J.P. Martin, G. Nicoletti et J. Oliveira-Martins (1992), « GREEN – a multisector, multi-region general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions: a technical model », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 116 (mai).
- Cline, W.R. (1992), *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington.
- Dean, A. et P. Hoeller (1992), « Costs of reducing CO₂ emissions : evidence from six global models », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 122 (juillet).
- Hoeller, P., A. Dean et J. Nicolaisen (1991), « Incidences macro-économiques de la réduction des émissions de gaz à effet de serre : examen de quelques études empiriques », *Revue économique de l'OCDE*, n° 16 (printemps).
- Manne, A.S. (1992), « Global 2100 : alternative scenarios for reducing carbon emissions », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 111 (avril).
- Oliveira-Martins, J., J.-M. Burniaux, J.P. Martin et G. Nicoletti (1992), « The costs of reducing CO₂ emissions : a comparison of carbon tax curves with GREEN », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 118 (juillet).
- Rutherford, T. (1992), « The welfare effects of fossil carbon restrictions : results from a recursively dynamic trade model », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 112 (avril).
- Vouyoukas, L. (1992), « Carbon taxes and CO₂ emissions targets : results from the IEA model », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 114 (avril).
- Whalley, J. et R. Wigle (1992), « Results for the OECD comparative modelling exercise from the Whalley-Wigle model », *Documents de travail du Département des Affaires économiques de l'OCDE*, n° 121 (juillet).