Revue économique de l'OCDE, nº 16, printemps 1991

INCIDENCES MACRO-ÉCONOMIQUES DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSONS DE GAZ A EFFET DE SERRE: EXAMEN DE QUELQUES ÉTUDES EMPIRIQUES

Pater Hoeller, Andrew Dean et Jon Nicolaisen

TABLE DES MATIÈRES

Introduction et conclusions 52
- A. Domaine couvert 52
- B. Résumé des principaux résultats 52
- C. Implications pour la politique économique 55

I. Modèles examinés 56

II. Scénarios de référence 59
- A. Facteurs déterminants des niveaux de référence des émissions de CO_2 59
- B. Éventail des taux d'accroissement des émissions de CO_2 62
- C. Autres gaz à effet de serre 64

III. Scénarios de réduction des émissions 64
- A. Réduction des émissions de CO2 liées à l'utilisation de combustibles fossiles 64
- B. Déterminants clés des coûts globaux 70
- C. Solutions reposant sur la sylviculture 78
- D. Coût de la réduction des émissions de CFC 80

Annexe: L'effet de serre. 84

Bibliographie.. 87

Les auteurs de ce document, au moment où celui-ci a été rédigé, en 1990, travaillaient tous au sein de la Division des questions économiques générales. M. Jon Nicolaisen a maintenant repris ses fonctions au ministère des finances de la Norvège. Ils tiennent a remercier les nombreux collègues de l'OCDE qui, au Département des affaires économiques et statistiques, à la Direction de l'environnement et à l'Agence internationale de l'énergie, leur ont apporté des commentaires et suggestions appréciables à différents stades des travaux, en particulier MM. Jean-Marc Burniaux, Jorgen Elmeskov, Robert Ford, John P. Martin et Rüdiger Soltwedel. Leur gratitude va également à un grand nombre de personnes, dont les modèles sont cités en exemple, pour leurs avis concernant une version antérieure de cette étude, mais ils assument l'entière responsabilité des erreurs et lacunes qui pourraient subsister. Des remerciements particuliers sont adressés à Mme Jackie Gardel pour son assistance technique.

INTRODUCTION ET CONCLUSIONS

A. Domaine couvert

Cette étude fournit une vue d'ensemble des estimations qui prévalent sur les coûts macro-économiques liés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces coûts constituent désormais une question essentielle pour les pouvoirs publics car les GES sont actuellement émis à des niveaux qui paraissent devoir susciter un réchauffement à l'échelle mondiale (voir annexe). Ils comprennent à la fois des coûts d'ajustement à court terme et des coûts persistants à long terme. Toutefois, il importe de situer les coûts liés à la réduction des émissions dans un cadre plus large englobant d'autres dispositions envisageables face au changement climatique[1]. La perspective de ce changement climatique appelle en effet deux démarches opposées: l'inaction, qui revient à accepter les risques de dommages et les coûts d'adaptation correspondants, et la prévention, par laquelle on s'efforce d'éviter les dommages en question. Entre ces deux extrêmes, on peut envisager toutes sortes de solutions associant à des degrés divers la prévention et l'adaptation.

En supposant que les émissions de GES soient très fortement freinées aujourd'hui, un réchauffement reste malgré tout à prévoir au cours des prochaines décennies, compte tenu du décalage entre les émissions et leurs effets. Une certaine adaptation à un climat plus chaud sera par conséquent inéluctable. Les coûts des dommages et les coûts d'adaptation entraînés à terme risquent d'être d'autant plus élevés que les mesures préventives auront été peu importantes. Mais celles-ci sont quant à elles de nature à accroître les coûts marginaux. Il importe donc de trouver un équilibre dans lequel l'actualisation jouera un rôle décisif. On obtient un « dosage » de mesures optimal lorsque le coût marginal des réductions d'émissions est égal à i'avantage marginal que représentent les coûts évités en matière de dommages et d'adaptation (Nordhaus, 1990*a*). Cependant, la plupart des études n'ont pas pour objet d'estimer simultanément les coûts et les avantages et ne peuvent par conséquent mettre en évidence le point optimal à atteindre. La principale difficulté réside dans l'évaluation chiffrée des avantages liés à la réduction des émissions. Or les études, en majorité, mettent l'accent sur les coûts, et c'est uniquement à des travaux de ce type que nous nous intéresserons ici.

Cette étude se limite en outre aux coûts macro-économiques ou touchant l'économie dans son ensemble, et plus particulièrement aux coûts liés à la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO_2), principal gaz à effet de serre. Les aspects sectoriels ne sont donc pas abordés, et, inévitablement, les questions pour lesquelles on dispose de réponses quantifiables sont privilégiées. Toutefois, au stade actuel des travaux sur les solutions envisageables face au changement climatique, il importe de faire le bilan des résultats fournis par l'analyse quantitative quant aux coûts économiques d'une réduction des émissions de CO_2. L'éventail des réponses obtenues ne peut être considéré comme définitif car il s'agit d'un domaine de recherche de plus en plus dynamique. Par ailleurs, il n'est pas possible dans ce document de proposer une évaluation rigoureuse des estimations effectuées ou un compte rendu complet des points divergents ; ce travail ne pourra être réalisé qu'à l'aide d'une étude comparative plus précise des propriétés des modèles, exercice en cours au sein de l'OCDE et d'autres organismes. La synthèse des estimations de coûts effectuée ici n'en constitue pas moins l'amorce d'une base économique chiffrée pouvant étayer les échanges de vues sur l'action à mener face au changement climatique.

B. Résumé des principaux résultats

Les mesures visant à ralentir ou à arrêter le réchauffement mondial supposent une réduction des émissions de GES par rapport aux niveaux ***actuels.*** Or les scénarios de référence décrivant les tendances prévues en l'absence de mesures de lutte indiquent, à long terme, une croissance annuelle des émissions de CO_2 de l'ordre de 0.5 à 1.5 pour cent, l'augmentation étant relativement plus rapide avant 2025 et plus lente par la suite (parallèlement au ralentissement de l'accroissement démographique et de l'augmentation de la production). Les principales différences entre les scénarios d'émissions proviennent des incertitudes qui entourent les prévisions concernant l'accroissement démographique, le progrès technique (notamment les prix des « techniques régulatrices »[2]), les prix de l'énergie et la disponibilité des ressources.

Du fait que, d'après les scénarios de référence, les émissions continueront à augmenter, la moindre réduction par rapport aux niveaux ***actuels*** suppose de très fortes diminutions par rapport aux niveaux prévus à long terme. On compte que si on parvient à réduire sensiblement les émissions de CO_2 liées à l'énergie, les ***taux de croissance*** du PIB enregistreront globalement une baisse de l'ordre de 0 à 0.3 point de pourcentage, bien qu'en raison des limites de tels modèles une très grande incertitude entoure ces estimations. Or cette baisse de croissance du PIB par rapport au taux de référence, si faible soit-elle, se traduirait à long terme par une baisse de ***niveau*** du PIB.

L'ampleur de la réduction affectant la croissance économique à longue échéance est essentiellement déterminée par le degré d'interchangeabilité entre les différentes sources d'énergie et d'autres moyens de production, ainsi que par la disponibilité et le prix des techniques régulatrices utilisant peu de carbone. Plus les possibilités de substitution seront importantes, plus le coût lié à une quelconque diminution de la consommation énergétique sera faible en termes de croissance. Dans le même ordre d'idée, l'existence de techniques régulatrices bon marché utilisant peu de carbone permettrait aux pays de faire face à la raréfaction de certains combustibles fossiles tels que le pétrole ou le gaz naturel sans avoir à se tourner vers le charbon, certes disponible en grandes quantités mais plus riche en carbone que tous les autres combustibles fossiles.

Le déroulement chronologique des réductions d'émissions constitue également un facteur important. Une forte réduction des émissions de CO_2 risque d'être d'autant plus coûteuse qu'on ne dispose pas encore de techniques bon marché utilisant peu de carbone et qu'une partie de l'équipement en place peut cesser d'être rentable. Les moyens d'intervention employés pour réduire les émissions influeront eux aussi sur l'ampleur des coûts. Selon toute probabilité, les coûts macro-économiques augmenteront bien davantage si la démarche adoptée pour limiter les émissions de CO_2 fait appel à des contraintes assorties de sanctions que si elle met en œuvre des incitations économiques. Par ailleurs, dans les cas où les politiques sectorielles ne sont pas optimales à l'origine, certaines modifications, apportées par exemple aux politiques des transports ou de l'énergie, pourraient constituer un moyen relativement peu coûteux de réaliser les premières réductions d'émissions de CO_2.

Il est à prévoir que la réduction des émissions de CO_2 sera bien plus coûteuse dans les pays en développement en raison d'une croissance structurelle plus rapide. Seraient-ils autorisés à doubler ou à tripler leurs émissions au cours des cent prochaines années qu'ils auraient encore à supporter des coûts plus élevés que les pays développés contraints de respecter des objectifs plus rigoureux. Mais par ailleurs, les émissions de CO_2 liées aux activités humaines ne peuvent être sensiblement réduites à l'échelle mondiale que si les pays en développement prennent eux aussi des mesures dans ce sens.

Concernant les autres **GES** et les diverses solutions envisageables, un accord international a été conclu en vue d'une forte réduction des émissions de CFC. Du fait que certains produits de remplacement soient relativement bon marché, une très forte réduction de ces derniers peut être obtenue à un coût relativement faible comparé à celui que représentent de fortes réductions des autres gaz à effet de serre. Il pourrait être également peu coûteux de mettre un terme au déboisement dans les zones tropicales. En revanche, le coût risque d'être beaucoup plus élevé pour d'autres solutions faisant appel à la sylviculture, telles que le reboisement. La suppression des CFC et l'arrêt du déboisement diminueraient sensiblement les

quantités de GES émis chaque année. Mais une forte baisse de la consommation de combustibles fossiles n'en resterait pas moins indispensable pour réaliser les réductions de grande ampleur nécessaires à une stabilisation de la concentration totale de GES.

C. Implications pour la politique économique

Il s'agit essentiellement ici d'exposer et d'analyser les différences entre les scénarios de réduction des émissions ; elles ont été brièvement évoquées dans la section précédente. Cette section va au-delà des conséquences directes des estimations de coûts examinées pour mettre en évidence des réflexions générales à prendre en compte dans la définition des grandes orientations.

Pour qu'une stratégie soit efficace par rapport à son coût, elle doit être fondée sur un examen complet des moyens d'action, traitant à la fois les coûts et les avantages liés aux politiques envisagées pour juguler le changement climatique. L'accent est mis ici sur les coûts. Mais il importe que les avantages apportés par la prévention du changement climatique, domaine encore peu étudié, soient également pris en compte. L'éclairage très précis choisi dans ce document permet néanmoins de tirer quelques enseignements sur les mérites respectifs des diverses politiques envisageables pour réduire les émissions.

Premièrement, pour que le rapport coût-efficacité d'une stratégie soit satisfaisant, il conviendrait d'étudier les possibilités de réduction pour *tous* les gaz à effet de serre, en tenant compte de leur part relative dans le changement climatique. Or jusqu'à présent, les recherches ont été axées sur les émissions de CFC et sur la production de CO_2 liée à l'utilisation de combustibles fossiles, la progression des autres GES étant délicate à modéliser.

Deuxièmement, comme il a été indiqué dans le résumé ci-dessus, le retrait progressif des principaux CFC récemment convenu et l'arrêt des prélèvements réguliers sur les forêts tropicales permettraient de réduire sensiblement la part du réchauffement imputable aux émissions de GES et seraient réalisables à un coût relativement modéré.

Troisièmement, le choix de politiques utiles dans tous les cas, même si leur portée est limitée, peut se traduire par un coût très faible, voire nul. Une réduction notable des émissions de CO_2 peut en effet accompagner les améliorations d'autres aspects des politiques menées dans divers secteurs tels que les transports, l'énergie, la sylviculture etc.

Quatrièmement, les stratégies et politiques réglementaires qui prévoient des taxes sur les apports énergétiques sans viser plus particulièrement la teneur en carbone des combustibles fossiles risquent fort d'augmenter sensiblement le coût des stratégies de lutte.

Enfin, le changement climatique constitue un problème mondial et appelle des mesures d'une portée correspondante. Afin d'éviter que des pays bénéficient

des retombées d'un éventuel accord international dans ce domaine sans assumer les obligations correspondantes, ledit accord devra être signé par le plus grand nombre de pays possible.

I. MODÈLES EXAMINÉS

Le caractère limité du domaine couvert ici a déjà été évoqué précédemment. Il s'agit d'examiner les études plus particulièrement axées sur le coût des réductions d'émissions dans lesquelles les incidences macro-économiques sont envisagées du point de vue quantitatif[3]. Cet éclairage ramène les nombreux documents consacres à la modélisation et à l'analyse des aspects économiques du changement climatique à un ensemble plus facilement exploitable. Les modèles inventoriés sont au nombre de quatorze. Certains ont toutefois été employés par plusieurs auteurs, tandis que différentes versions plus ou moins avancées d'un même modèle ont pu être utilisées par leur auteur dans des documents successifs. Le tableau 1 donne les principales caractéristiques des modèles, les modèles mondiaux en nombre limité figurant en premier, suivis par les modèles nationaux plus nombreux.

Le modèle mondial le plus complet quant à la modélisation du secteur de l'énergie et aux effets en retour de ce secteur sur la production globale a pour auteurs Manne et Richels **(1990).** Toutefois, les liaisons entre les régions n'ont pas été établies, de sorte que les flux de revenus entre les régions et les effets réciproques sur l'approvisionnement énergétique ne sont pas modélisés de manière cohérente. Les répercussions survenant par le biais des échanges internationaux ne sont donc pas prises en compte, bien que la dernière version de leur modèle mondial pour 2100 prévoit l'existence de permis négociables[4]. En outre, ce modèle ne distingue pas les différents secteurs industriels. Le secteur de l'énergie est abordé de manière plus complète, mais les liaisons macro-économiques sont moins développées, dans les modèles concus par Edmonds et Reilly **(1983),** Nordhaus **(1990)** et l'AIE **(1990).** Si le modèle de Whalley et Wigle **(1990)** ne rend pas suffisamment compte des aspects dynamiques (il s'agit d'un modèle statique-comparatif appliqué d'équilibre général), il est néanmoins globalement cohérent et assez détaillé au niveau sectoriel; il peut ainsi fournir des indications sur les effets de différents types d'accords internationaux visant à résoudre le problème du réchauffement mondial.

Les modèles mondiaux sont encore relativement peu nombreux, même si le changement climatique est par nature un problème d'ampleur planétaire. On trouve beaucoup plus de modèles concernant un seul pays, en partie parce que les problèmes de collecte de données et de calcul sont plus faciles à résoudre. Il

Tableau 1. **Principales caractéristiques des modèles examinés**

	Type de modèle	Échéance[1]	Nombre de: Sources d'énergie[2]	Nombre de: Branches d'activité	Portée régionale[3]
		A. Modèles mondiaux			
Manne/Richels (1990)	Dymanique d'optimisation	2100	9	–	5 régions
Whalley/Wigle (1990)	Statique d'équil. général	2030[4]	2	5	6 régions
Edmonds/Reilly (1983)[5]	Dynamique d'optimisation	2100	6	–	9 régions
AIE (1990)	Économétrique de l'énergie	2005	5	9	10 régions
Nordhaus (1990)	Dynamique d'optimisation	2100	2	–	Non détaillé au niveau régional
		B. Modèles nationaux			
CBO (1990)					
DRI	Macro-économique multi-sectoriel	2000			États-Unis
DGEM	Dyn. d'équilibre général	2000	4	9	États-Unis
Jorgenson/Wilcoxen (1990)	Dyn. d'équilibre général	2060	3	35	États-Unis
Blitzer *et al.* (1990)	Dyn. d'équilibre général	2002	3	10	Egypte
Glomsrød *et al.* (1990)	Dyn. d'équilibre général	2010	3	31	Norvège
SIMEN (1989)	Macro-économique multi-sectoriel	2000			Norvège
NEPP (1989)	Macro-économique multi-sectoriel	2010			Pays-Bas
Bergman (1989)	Dyn. d'équilibre général	2000	2	5	Suède
Dixon *et al.* (1989)	Dyn. d'équilibre général	2005		113	Australie

1. Fin de la période couverte par la simulation.
2. Y compris l'électricité.
3. Régions concernées par les différentes études.
4. Calculs basés sur des valeurs moyennes pour la période 1990-2030.
5. Modèle employé par Cline (1989), Mintzer (1987) et Edmonds et Barns (1990).

existe une relation inverse entre la place accordée aux régions et la place accordée aux secteurs, comme le montre, pour le secteur industriel, le degré de détail plus ou moins poussé selon qu'il s'agit de modèles nationaux ou de modèles mondiaux. S'il importe que les données régionales soient plus détaillées pour analyser les conséquences en termes d'échanges internationaux et de bien-être découlant de divers types d'accords mondiaux, un examen détaillé au niveau sectoriel s'impose, par exemple, pour mettre en évidence les répercussions des politiques sur la structure industrielle. En outre, il est dans une certaine mesure indispensable de procéder à une ventilation par sources d'énergie primaire, puisque la production globale dépend de l'interchangeabilité supposée de sources d'énergie plus ou moins riches en carbone.

Les émissions de gaz à effet de serre doivent être analysées sur de longues périodes du fait des délais importants qui séparent l'émission des GES et, dans un premier temps, l'observation de leur concentration puis, à terme, les effets sur le climat. C'est pour ces raisons que, comme l'indique le tableau 1, de nombreuses prévisions concernant les émissions de GES au niveau mondial s'étendent jusqu'à la fin du 21e siècle. Certains auteurs ont émis l'idée que cette échéance est encore trop proche, puisque les principales répercussions du changement climatique ne seraient pas percues avant plusieurs siècles. En revanche, de nombreux modèles nationaux sont axés sur des durées courtes et moyennes, peut-être parce que des réductions Unilatérales à long terme ne modifieraient guère les concentrations et seraient extrêmement coûteuses par rapport aux avantages obtenus pour le pays concerné. La plupart des études portent exclusivement sur les émissions de CO_2 liées aux combustibles fossiles, qui, largement responsables des quantités de GES relevées, sont par ailleurs les plus faciles à relier au comportement économique. Les études couvrant les émissions de CO_2 imputables à d'autres causes sont au nombre de trois seulement (Mintzer, 1987 ; Nordhaus, 1990; Edmonds et Barns, 1990).

Les types de modèles diffèrent suivant les questions à résoudre. Les macro-modèles à court terme permettent de chiffrer les coûts de transition ou d'ajustement à court terme tels que les dépenses supplémentaires de contrôle de la pollution, les pertes prévisibles de production dues au vieillissement prématuré du capital ou à son désormais manque de rentabilité. Ils couvrent aussi les problèmes d'ajustement sur le marché du travail ou les effets des différentes mesures macro-économiques envisageables face aux variations de prix provoquées par les taxes. A brève échéance, le fait que les possibilités de substitution ne soient guère modélisées n'est probablement pas déterminant puisque l'élasticité de substitution est normalement faible sur une courte période. Les modèles à long terme, qui parfois même incluent ces coûts d'ajustement, sont plus aptes à modéliser les possibilités de substitution et la réaffectation des ressources de manière réaliste. Les frictions immédiates ne joueront probablement qu'un rôle secondaire dans le

profil de la croissance sur une longue période. Par ailleurs, il est important, pour l'analyse, de modéliser la formation de capital, d'incorporer le changement technique, et d'évaluer la perte sèche pour l'économie entraînée par la fiscalité. Le modèle d'équilibre général appliqué et le modèle dynamique d'optimisation sont les moyens les plus indiqués pour traiter ces questions à long terme.

Le travail entrepris ici consiste à examiner les résultats des modèles décrits dans le tableau 1 et à effectuer une première analyse de certaines des raisons qui se dégagent pour expliquer la diversité de ces résultats. Il convient toutefois de préciser qu'il ne s'agit pas de décrire dans le détail les variations des scénarios de référence et des scénarios de réduction d'une étude à l'autre, car les valeurs d'importants paramètres manquent bien souvent et les analyses de sensibilité à des modifications des paramètres ne sont communiquées que dans un petit nombre de cas. L'intensification des travaux indispensable pour une évaluation complète des différents modèles suppose des analyses plus précises du même type que l'exercice de comparaison entrepris par l'Energy Modelling Forum de l'Université américaine de Stanford et que l'exercice moins ambitieux, limité aux modèles mondiaux, effectué par l'OCDE.

II. SCÉNARIOS DE RÉFÉRENCE

A. Facteurs déterminants des niveaux de référence des émissions de CO_2[5]

Pour saisir les différences entre divers scénarios de référence concernant les émissions de CO_2, on peut se pencher utilement sur les facteurs déterminants de l'accroissement des émissions (tels qu'ils figurent dans le tableau 2).

Croissance de la production. La plupart des études à long terme de portée mondiale prennent comme hypothèse une croissance annuelle du PIB de 2 pour cent environ au cours du siècle à venir, cette croissance étant généralement plus forte au cours des prochaines décennies. Le ralentissement qui en découle correspond principalement à une diminution de l'accroissement démographique dans les pays en développement. Ces études partagent également l'hypothèse d'une croissance bien plus rapide, en moyenne, dans les pays développés que dans les pays en développement. Pourtant, aucune des projections de référence concernant la croissance future ne contient d'estimation des coûts et avantages associés au changement climatique car les données de référence sont tirées de modèles qui ne prennent pas en compte les répercussions climatiques (favorables ou défavorables).

Tableau 2. **Projections de référence des variables clés**

	Période de prévision	Taux de croissance annuels							Niveaux en fin de période	
		PIB	Rendement énergétique	Demande finale d'énergie		Prix de l'énergie		Émissions en équivalent CO_2	Concentrations des GES[1]	Réchauffement (°C)
				Total	Sources fossiles	Total	Sources fossiles			
Études mondiales										
Manne/Richels (1990)	1990-2100							1.4		
États-Unis		1.6	0.5	0.9				1.1		
Autres pays de l'OCDE		1.6	0.5	0.9				1.1		
Europe de l'Est (y compris l'URSS)		1.6	0.3	0.9				0.7		
Chine		3.5	2.0	2.6				2.1		
Reste du monde		3.0	0.0	2.3				2.0		
AIE (1990)	1987-2005			2.2			3.1	2.2		
Cline (1989)	1975-2075			1.0	0.9			0.8	>600	1.5-4.2[2]
Reilly *et al.* (1987)	1975-2075		1.0					0.5	430-590	3
Mintzer (1987)	1975-2075	2.0	0.8	1.3				1.5	825	
Nordhaus/Yohe (1983)	1975-2100	2.1		1.4	0.9	0.2	1.0	1.2	780	
Nordhaus (1990)		1.1						1.1	600	3[2]
Nordhaus (1977)	1980-2100			1.4				1.6		
Edmonds/Barns (1990)	1988-2025	3.0	1.0	2.0				1.2		
Études nationales										
SIMEN (1989) (Norvège)	1988-2000	1.5		1.1				1.6		
Glomsrød *et al.* (1990) (Norvège)	2000-2010	2.7					1.0	3.9		
Blitzer *et al.* (1990) (Egypte)	1987-2002	3.5						2.2		
Bergman (1989) (Suède)	1985-2000	2.0		0.7				5.3		
Dixon *et al.* (1989) (Australie)	1989-2005	3.4		2.6[3]				2.7[3]		
CBO (1990) (États-Unis)	1988-2000				1.1			1.1		

1. Exprimées en ppm, d'équivalent CO_2. 2. Dans le cas d'un doublement des émissions de CO_2. 3. Pour l'électricité et les transports routiers.

Rendement énergétique. Dans les modèles étudiés, le rendement énergétique est considéré comme un paramètre exogène essentiel. Les estimations relatives à la croissance de référence du rendement énergétique intrinsèque vont de 0 à 2 pour cent par an selon les régions d'après Manne et Richels (1990). La moyenne donnée par ces auteurs pour l'ensemble du monde est proche des hypothèses avancées respectivement par Mintze (1987) et Reilly *et al.* (1987), selon lesquelles les taux de croissance à long terme du rendement énergétique seraient de 0.8 et 1 pour cent en moyenne, respectivement.

Prix de l'énergie. Pour la plupart, les études prévoient au cours du siècle à venir une hausse des prix relatifs de l'énergie, correspondant à l'épuisement des réserves et à l'augmentation des coûts de prospection et d'extraction, la hausse étant plus particulièrement marquée pour les prix des combustibles fossiles[6]. La majorité des scénarios de référence donnent à penser que l'utilisation de combustibles fossiles sera limitée par des contraintes de capacité, même en l'absence de mesures particulières visant à limiter les émissions de GES[7].

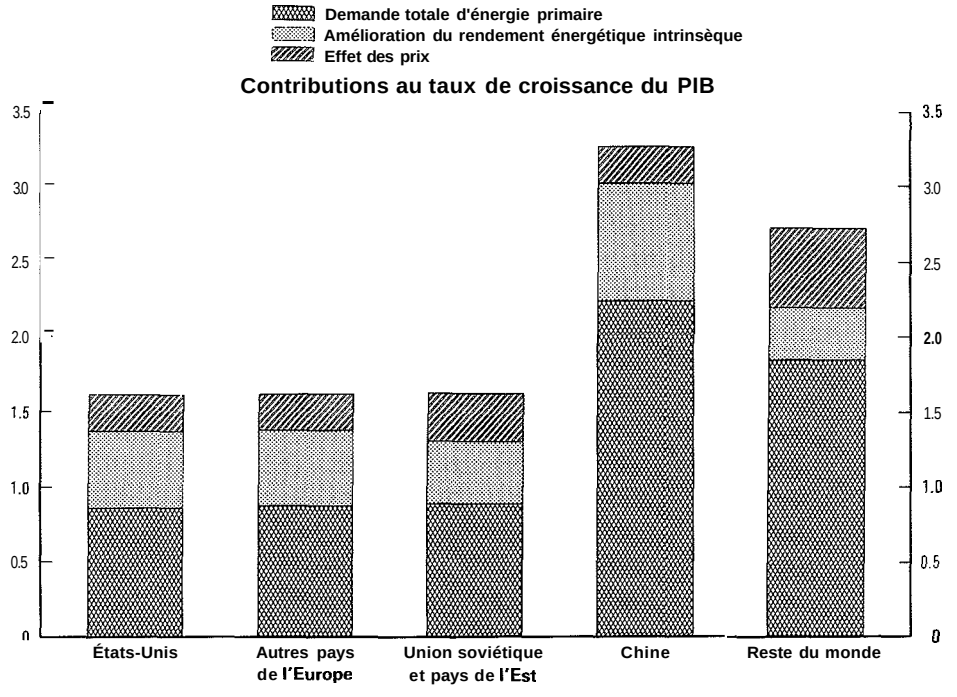
La hausse des prix de l'énergie et l'amélioration du rendement énergétique conduisent à une croissance de la demande globale d'énergie plus lente que la croissance de la production. C'est ainsi que selon les estimations de Nordhaus et Yohe (1983), les taux de croissance de la demande totale d'énergie finale et de la demande de combustibles fossiles avoisinent respectivement 1.4 et 0.9 pour cent par an seulement, même si la croissance annuelle de la production dépasse 2 pour cent.

Le graphique 1 illustre les écarts entre la croissance de la production et la croissance de la demande d'énergie en faisant apparaître les différentes composantes, à savoir le rendement énergétique intrinsèque et le remplacement des sources énergétiques, pour le scénario de référence concu par Manne et Richels (1990*a*). La lenteur relative de la croissance de la demande, par rapport à celle de la production, est davantage imputable à la progression du rendement énergétique qu'au processus de substitution, sauf dans le cas des pays en développement, la Chine faisant exception puisqu'on y trouve l'accroissement de rendement énergétique le plus important. L'élasticité de substitution entre les besoins totaux d'énergie et l'ensemble des facteurs que constituent le travail et le capital est généralement de l'ordre de 0.5.

Techniques régulatrices. La plupart des analyses prévoient une réduction exogène des prix de l'énergie par suite du progrès technique. Par exemple, Reilly *et al.* (1987) estiment que les prix de l'approvisionnement en énergie solaire et en énergie nucléaire « sûre » baisseront respectivement de 2.5 et 0.6 pour cent par an. En outre, si les prix des autres combustibles s'élèvent, les techniques régulatrices deviendront plus compétitives par rapport aux combustibles classiques (combustibles fossiles, principalement). Manne et Richels (1990) déterminent les limites supérieures des taux de croissance de l'investissement consacré à ces

GRAPHIQUE 1

ÉCART ENTRE LA CONSOMMATION TOTALE D'ÉNERGIE PRIMAIRE ET LA CROISSANCE DU PIB POUR LA PÉRIODE 1990-2100



Source : Manne et Richels (1990)

nouvelles formes d'énergie et tablent sur un ensemble de dates précises à partir desquelles les techniques régulatrices entreront en service et deviendront compétitives. Ils estiment par exemple que la production d'électricité à partir de l'énergie solaire coûtera entre 5.1 et 11.1 cents par kWh en 2010. Torrens (1989) et Hubbard (1989) estiment quant a eux que les prix de l'énergie solaire produite a l'aide de techniques régulatrices seront égaux ou inférieurs à 10 cents par kWh en l'an 2000, chiffres qui correspondent approximativement à ceux de Manne et Richels, tandis que les prix estimés par Dixon *et al.* (1989) pour la fin du siècle en Australie sont légèrement inférieurs à 10 cents'.

B. Éventail des taux d'accroissement des émissions de CO_2

La quantité de CO_2 émis chaque année dans le monde est passée d'un niveau estimé à 1.5 milliard de tonnes en 1950 à plus de 6 milliards de tonnes en 1990.

Le taux annuel d'augmentation a été, en moyenne, divisé par deux (passant de 4.8 pour cent à 2 pour cent) entre la période 1950-70 et la période 1970-88 (Edmond et Barns, 1990), évolution qui correspond à un ralentissement de la croissance de la production, ainsi qu'aux répercussions non négligeables de la fluctuation des prix de l'énergie au cours de la deuxième période considérée.

En dépit d'importantes marges d'incertitude, on s'accorde à considérer dans les différentes études que les émissions de CO_2 risquent fort d'augmenter sensiblement au cours du siècle à venir. On estime généralement que le taux annuel d'augmentation des émissions de CO_2 imputables aux combustibles fossiles se situera entre 0.5 et 1.5 pour cent pour l'ensemble du monde durant la période antérieure à 2075. Tous les scénarios indiquent un accroissement plus rapide des émissions pendant les prochaines décennies et un ralentissement notable par la suite. L'AIE, par exemple, prévoit que les émissions pourraient augmenter de plus de 2 pour cent par an au cours des 20 prochaines années. Les prévisions de Reilly *et al.*. (1987), aussi modérées soient-elles, signifient malgré tout qu'en 2075, les émissions de CO_2 dépasseront les niveaux actuels de plus de 50 pour cent[g]. Les projections réalisées dans le cadre d'autres études laissent penser que ces émissions auront plus que doublé d'ici 2075, **l'IPCC** évoquant même, si la tendance se confirme, la possibilité que les émissions soient multipliées par quatre d'ici la fin du siècle prochain (IPCC, 1990).

La diversité des projections relatives aux émissions anthropiques de CO_2, mise en évidence par le tableau 2, s'explique avant tout par:

- Des différences d'estimation de la croissance de la production et de l'augmentation du rendement énergétique; plus l'augmentation du rendement énergétique est forte, plus la croissance de la demande d'énergie finale est faible par rapport à celle de la production.
- Des différences d'estimation de la croissance des prix réels de l'énergie et du moment où des techniques régulatrices appropriées n'utilisant pas de carbone entreront en service. L'étude réalisée par l'AIE (1990), par exemple, montre une hausse rapide des prix de l'énergie, mais part de l'hypothèse que les possibilités de remplacement par des combustibles non fossiles seront très limitées durant les dix années à venir, tandis que la demande d'énergie finale augmentera de plus de 2 pour cent. Dans une optique à long terme, Manne et Richels (1990*a*) font explicitement intervenir des techniques régulatrices faisant reculer la demande de combustibles fossiles.

La majorité des modèles à long terme indiquent qu'un problème crucial apparaîtra lorsque les produits de remplacement des combustibles classiques deviendront compétitifs et que leur mise en service à grande échelle sera amorcée. Vraisemblablement, les réserves de pétrole, et plus encore celles de gaz naturel, s'amenuiseront rapidement au cours du siècle prochain, alors que les réserves de

charbon sont bien plus abondantes. Le charbon n'en est pas moins le combustible fossile le plus riche en carbone. Il est probable que les hausses de prix des combustibles fossiles actuellement utilisés susciteront l'adoption de techniques régulatrices et l'amélioration de techniques n'utilisant pas de combustibles fossiles.

C. Autres gaz à effet de serre

La plupart des pays sont convenus de réduire très fortement l'utilisation de CFC d'ici la fin du siècle. Il est difficile de modéliser l'augmentation des émissions d'autres gaz à effet de serre en raison, comme dans le cas du méthane et de l'hémioxyde d'azote, de la diversité des sources et des incertitudes quant aux coefficients d'émission. Comme on l'a remarqué précédemment, la quasi-totalité des modèles examinés sont axés uniquement sur les émissions anthropiques de CO_2, même si quelques solutions visant à réduire d'autres gaz à effet de serre sont brièvement envisagées à la fin de la section suivante.

III. SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS[10]

A. Réduction des émissions de CO_2 liées à l'utilisation de combustibles fossiles

Objectifs** de **réduction. Depuis les travaux novateurs de Nordhaus (1977), on a tenté à plusieurs reprises d'estimer les incidences macro-économiques des réductions de CO_2 à l'échelle mondiale. Les objectifs de réduction figurant dans les études examinées ici sont souvent donnés par rapport à l'année de référence. Dans l'étude de Manne et Richels (1990*a*), par exemple, l'objectif consiste à diminuer les émissions de 20 pour cent d'ici 2020 par rapport aux chiffres de l'année de référence et à les maintenir à ce niveau plus faible jusqu'en 2100. De même, Dixon ***et** al.* simulent les prolongements de la fixation, à Toronto, d'un objectif visant à réduire les émissions de CO_2 de 20 pour cent d'ici 2005 par rapport au niveau de 1988. Cette évolution suppose que les émissions de CO_2 soient ramenées à près de 50 pour cent au-dessous de ce qui serait alors le niveau de référence. Quant à l'étude réalisée par l'IPCC (1990), elle indique qu'une réduction considérable des émissions de CO_2, supérieure à 60 pour cent par rapport aux chiffres de 1990, s'impose pour stabiliser les concentrations dans l'atmosphère d'ici 2050.

Mécanismes** de **réduction des émissions. Les principaux moyens d'intervention envisagés visent à appliquer des taxes différentes selon la teneur en

carbone des types de combustibles fossiles utilisés. Ces distinctions s'appuient sur le fait que les quantités de carbone émis sont plus faibles si on consomme du pétrole que si on consomme du charbon, et encore moindres s'il s'agit de gaz naturel (tableau **3).** Mais le charbon est par ailleurs le combustible fossile le plus abondant, et l'épuisement des réserves de gaz naturel et de pétrole risque fort d'augmenter à la fois la consommation de charbon et la demande de combustibles de synthèse (dont le coefficient d'émission est deux fois plus élevé que celui du pétrole).

Tableau 3. Coefficients d'émission de carbone des combustibles fossiles et prix des combustibles

	Coefficient démission de carbone, en tonnes de carbone, par million de BTU d'équivalent de brut'	Coût unitaire du combustible en dollars de 1988, par million de BTU d'équivalent de brut
Charbon – Utilisation directes	0.0251	2.00
Pétrole	0.0203	2.50–6.00
Gaz **naturels**	0.0145	1.50–5.002
Combustibles de synthèse	**0.0408**	10.00
Techniques régulatrices n'utilisant pas d'électricité	**0.0000**	20.00

1. BTU représente British Thermal Unit (1 BTU = 0.252 kcal). Coefficients d'émission de carbone fournis par Edmonds et Reilly (1985).
2. Pour obtenir le prix à la consommation équivalent, on ajoute 1.25 dollar par million de BTU afin de prendre en compte les coûts de distribution du gaz.

Source: Manne et Richels (1990).

Effets sur la croissance consécutifs à la réduction des émissions de CO_2. Ils sont brièvement récapitulés dans les tableaux 4 et 5 pour les différents modèles examinés. La colonne 2 de ces tableaux indique en pourcentage la différence entre les taux de croissance moyens des scénarios de référence et ceux des scénarios de réduction. Dans la colonne 3, on trouve une simulation de l'évolution du PIB pour la dernière année, exprimée en pourcentage, par rapport au niveau de référence (elle dépend bien entendu de la longueur de la période à laquelle se rapporte la simulation). Si on exclut l'étude relative à l'Egypte effectuée par Blitzer et al., qui fait ressortir des effets bien plus importants sur les taux de croissance moyens, et un scénario du NEPP (Plan national pour l'environnement des Pays-Bas), qui montre une augmentation de la production, la plupart des résultats obtenus grâce aux simulations font apparaître, à long terme, des baisses de taux

Tableau **4. Effet d'une réduction des émissions de CO_2 sur la croissance: modèles mondiaux**

	(1) Réduction des émissions par rapport à leurs niveaux de référence de la dernière année de la période considérée	(2) Variations du taux de croissance du PIB	(3) Écart en pourcentage par rapport à son niveau de référence du PIB de la dernière année	(4) Taxe sur le carbone (en dollars par tonne de carbone)	
				Valeur maximale	Dernière année
Manne/Richels (1990)					
États-Unis		-0.0	-2.5	400	
Autres pays de l'OCDE		–0.0	-1.8	250	
Europe de l'Est	-75	–0.0	-2.5	700	250
Chine	(2100)	–0.1	-10.5	250	
Reste du monde		–0.0	–4.0	250	
Whalley/Wigle (1990)[1]					
Taxes nationales à la production	-50		-4.42		462.
Taxes nationales à la consommation	-50		-2.12		463.1
Taxe mondiale	-50		–4.2[2]		459.7
Plafond démission par habitant	-50		–8.5[2]		
Cline (1989)	-65.5 (2075)	–0.1	-7.4		
Mintzer (1987)	-88 (2100)	-0.0	-3.0		
AIE (1990)[3]					
Scénario prévoyant une taxe sur le carbone	-12 (2005)	–0.2			72
Scénario prévoyant 70 % d'énergie nucléaire plus une taxe sur le carbone	-25 (2005)	-0.2			72
Nordhaus (1990 and 19906)					
Réduction faible	-30	-O.0			48.5[4]
Réduction moyenne	-50	-0.0			119.0[4]
Réduction forte	-80	*-0.1*			
Nordhaus (19906)					
Mise en œuvre rapide	-60	-0.35			
Mise en œuvre rapide faisant appel à une réglementation	-60	-0.55			
Edmonds/Barns (1990)	-75 (2025)	-0.2	-8.0		436.5

1. Les objectifs et les résultats se rapportent à des valeurs moyenne pour la période 1990-2030.
2. Effet sur le bien-être mesuré en termes de variation au sens de Kicks.
3. Les politiques et les résultats se rapportent uniquement aux pays de l'OCDE.
4. Hypothèse dune forte réduction des CFC. En l'absence de cette réduction, la taxe sur le carbone, exprimée en équivalent CO_2, serait respectivement de 90 et 200 dollars environ.
5. Pour les pays industrialisés.

Tableau **5. Effet d'une réduction des émissions de CO_2 sur la croissance: résultats par pays**

	(1) Réduction des émissions par rapport à leurs niveaux de référence de la dernière année de la période considérée	(2) Variations du taux de croissance du PIB	(3) Écart en pourcentage par rapport à son niveau de référence du PIB de la dernière année	(4) Taxe sur le carbone (en dollars par tonne de carbone)	
				Valeur maximale	Dernière année
Manne/Richels (1989, États-Unis)					
a) Scénario pessimiste du point de vue technique	–88 (2100)	–0.1	–4.0	600 (2020)	250 (2100)
b) Scénario intermédiaire du point de vue technique	–77 (2100)	–0.0	–2.5		
c) Scénario optimiste du point de vue technique	–50 (2100)	–0.0	–0.8		
CBO (1990, États-Unis)					
modèle DRI	–16 (2000)	–0.2	–2.0	100	100
DGEM	–36 (2000)	–0.1	–0.6	100	100
Jorgenson/Wilcoxen (1990, États-Unis)	–20 (2060)	–0.0	–0.5	17 (2020)	15 (2060)
	–36 (2060)	–0.0	–1.1	46 (2020)	42 (2060)
Blitzer *et al.* (1990, Egypt)					
Scénario 1	–15[1] (2002)	–0.1	–2.7		
Scénario 3	–35[1] (2002)	–1.0	–15.0		
Scénario 5	–40[1] (2002)	–1.5	–19.0		
Glomsrød et al.[2] (1990, Norvège)	–26 (2010)	–0.4	–2.7		
SIMEN[2] (1989, Norvège)	–16 (2000)	–0.1 à –0.2	–1 à –2		
NEPP (1989, Pays-Bas)[2]					
Scénario prévoyant des mesures nationales	–25 (2010)	–0.2	–4.2		
Scénario prévoyant de mesures mondiales	–25 (2010)	0.0	0.6		
Bergman (1990, Suède)	–51 (2000)	–0.4	–5.6		
Dixon *et al.* (1989, Australie)	–47[3] (2005)	–0.1	–2.4		

1. La dernière année de la période considérée pour les objectifs d'émission est 2012, les réductions atteignant alors respectivement –30%, –35% et –55%.
2. La réduction d'autres polluants est prise en compte.
3. Les réductions s'appliquent aux secteurs de l'électricité et des transports routiers.

de croissance, suscitées par une forte réduction des émissions, allant de près de zéro à 0.3 pour cent par an. A longue échéance, le taux de croissance simulé serait donc, en moyenne et à l'échelle mondiale, de **1.8** pour cent environ, contre 2 pour cent environ d'après les scénarios de référence. Comme on l'a indiqué ci-dessus, les comparaisons portant sur l'évolution de la croissance du PIB reposent sur l'hypothèse que le changement climatique est sans effet sur les taux de croissance de référence.

Ampleur des modifications fiscales. L'importance de la taxe marginale par unité de carbone permet d'apprécier le coût marginal des réductions d'émissions. Si le taux d'imposition est élevé, il peut être avantageux d'assouplir les réglementations appliquées au carbone. Si le taux est faible, on peut mener une politique plus ambitieuse se traduisant par un coût marginal également modéré. Les dernières colonnes des tableaux 4 et 5 indiquent le montant des taxes sur le carbone – exprimé en dollars par tonne de carbone – pour l'année marquant la valeur maximale et pour la dernière année de la période considérée par les scénarios de réduction des émissions. Le tableau 6 fait apparaître différents taux d'imposition et les valeurs correspondantes des réductions d'émissions. Bien que les taux d'imposition varient sensiblement d'un modèle à l'autre pour une réduction de même importance, deux conclusions s'imposent : on peut obtenir de faibles réductions d'émissions à peu de frais, mais on ne peut atteindre de fortes réductions que si les taux d'imposition, et par conséquent les coûts marginaux, sont élevés. Les coûts marginaux progressent donc parallèlement à l'ampleur des réductions. L'application d'une taxe de 250 dollars environ par tonne de carbone, dans le cas de réductions importantes (Manne et Richels, **1990,** et Nordhaus, **1990),** signifie que les prix sont multipliés par plus de cinq pour le charbon et plus de deux pour l'essence, et qu'ils augmentent fortement pour le gaz naturel".

Calendrier d'augmentations fiscales. Il peut être beaucoup plus coûteux de réduire fortement les émissions à court terme en raison de l'importance des coûts d'ajustement entraînés dans ce cas et de l'absence de techniques régulatrices bon marché. D'après les simulations de Manne et Richels **(1990).** par exemple, la taxe sur le carbone en Europe de l'Est et en Russie augmente jusqu'en 2020, dépassant 600 dollars par tonne, pour revenir ensuite à un niveau correspondant aux écarts des prix entre les combustibles classiques et les techniques énergétiques utilisant peu de carbone dont on pense disposer après 2020. Les effets sur les taux annuels de croissance, qui se traduiraient par une baisse de 0.3 pour cent durant la période antérieure à 2020, diminueraient par la suite. Une simulation effectuée par Nordhaus **(19906)** laisse penser que l'instauration rapide d'une réduction des émissions serait bien plus coûteuse quant à la croissance de la production car elle nécessiterait la mise au rebut prématurée d'une grande partie de l'équipement existant. Les simulations réalisées pour des pays particuliers, qui ne s'étendent généralement pas au-delà de 2020, font également apparaître des

Tableau **6. Réductions des émissions et taxe sur le carbone**

Pourcentage de réduction du CO_2 par rapport au profil de référence en fonction de l'importance de la taxe sur le CO_2 ou des coûts

Taxe (en dollars 1989 par tonne de carbone)	N-Y (1)	Version révisée N-Y (2)	Bodlund et *ai.* (3)	Kram-Okken (4)	Edmonds-Reilly (5)	Manne-Richels (6)	Modèle Nordhaus (7)	Modèle Argonne (8)
0	0.0	0.0	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**	**0.0**
10		3.5					5.0	
20	5.9	6.1					9.3	
30		9.8			40.0		16.8	
40		12.1		21.9				20.0
50		15.4						
60								
70								
80								
90							42.8	
100		21.0						
150		36.0					59.9	
160			63.2					
170								
180								
190							92.3	
200		43.2						
210								
220	38.5							
230								
240							78.1	
250			13.9					
260						82.2		
210							94.0	
300		53.9						
350								
430							91.5	

1. Nordhaus et Yohe (1983).
2. Version simplifiée du modèle Nordhaus-Yohe.
3. Bodlund et *ai.* (1989). Converti en coût marginal par W. Nordhaus.
4. Kram et Okken (1989). Converti en coût marginal par W. Nordhaus.
5. Edmonds et Reilly (1983).
6. Manne et Richels (1989).
7. Nordhaus (1977) et (1979). Les chiffres correspondent à différentes années et différentes contraintes.
8. Daly et *ai.* (1985). Tous les prix antérieurs sont convertis en prix de 1989 à l'aide de l'indice implicite des prix du PNB des États-Unis.

Source: Nordhaus (1990).

effets plus marqués sur la croissance que les modèles mondiaux à long terme. Toutefois, les pertes de production indiquées sont partiellement imputables à une baisse de la compétitivité[12].

B. Déterminants clés des coûts globaux

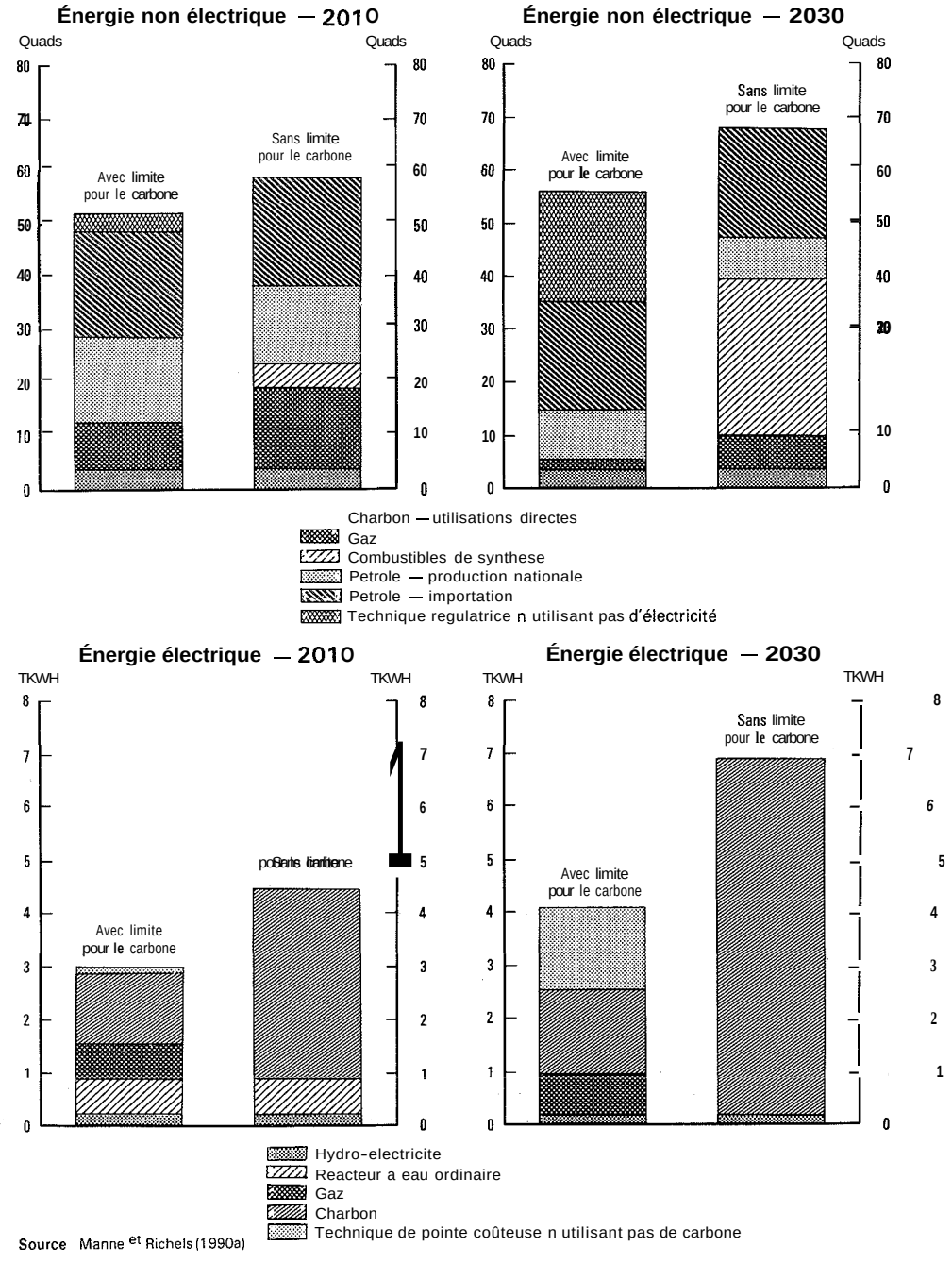
Substitution de combustibles. L'effet d'une taxe dont le montant varie selon la teneur en carbone du combustible utilisé dépendrait avant tout de la part représentée par les combustibles fossiles dans la production globale et des possibilités de substitution des sources d'énergie primaire. Il existe plusieurs formes de substitution : en premier lieu, on peut abandonner les combustibles fossiles à teneur élevée en carbone (par exemple le charbon) au profit de combustibles fossiles pauvres en carbone (tels que le gaz). Ensuite, des sources non fossiles (énergie nucléaire, énergie solaire) peuvent être substituées aux combustibles fossiles. Ces substitutions sont pour l'instant peu importantes du fait que les principales sources d'énergie non fossiles sont disponibles en quantités limitées (cas de l'hydro-électricité) ou comportent un risque pour l'environnement (cas de l'énergie nucléaire).

Cependant, une augmentation sensible du prix des combustibles fossiles pourrait rendre attrayante l'utilisation de sources énergétiques de substitution dépourvues de carbone et susciter une recherche plus active d'autres formes d'énergie non polluantes. Si les techniques régulatrices étaient largement disponibles, le coût de la réduction des émissions de CO_2 serait plus limité. Un accroissement des prix des combustibles fossiles tel que ces derniers deviennent supérieurs au prix des techniques régulatrices appliquées aux combustibles non fossiles réduirait sensiblement la consommation de combustibles fossiles à long terme. Par contre, en cas de possibilités limitées de substitution et en l'absence de techniques régulatrices bon marché, les réductions seraient surtout opérées selon une démarche coûteuse, à savoir une diminution de la consommation énergétique suscitée par l'intervention des autorités.

Le modèle élaboré par Blitzer *et al.* (1990) ne concerne que deux combustibles fossiles, le gaz et le pétrole, de sorte que les réductions d'émissions découlent essentiellement de baisses de revenu. La démarche adoptée explique en partie 'l'importance des effets sur la croissance égyptienne évalués dans cette étude. Les autres modèles traitent plus en détail le secteur de l'énergie et accordent une plus large place aux possibilités de substitution, si bien que d'importantes réductions des émissions de carbone sont réalisables à moindre coût. A long terme, l'existence de techniques énergétiques utilisant peu de carbone, largement disponibles à un coût modéré, permettra de réduire sensiblement les émissions de carbone par unité d'énergie produite. Le graphique 2 et le tableau 7, concus respectivement à partir des études de Manne et Richels (1990*a*) et de

GRAPHIQUE 2

INCIDENCE DES TAXES APPLIQUÉES AUX COMBUSTIBLES FOSSILES SUR LA PART RELATIVE DES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE



Source Manne et Richels (1990a)

Tableau 7. **Incidences des taxes appliquées aux combustibles fossiles sur les émissions de dioxyde de carbone'**

	Fourniture d'énergie primaire (en 10^{18} joules par an)						
	Pétrole	Gaz	Combustibles solides	Energie nucléaire	Energie solaire	Hydro-électricité	Total
Scénario de référence							
2000	141.5	49.2	147.3	15.3	0.1	57.2	410.6
2025	147.7	95.1	179.3	32.4	13.0	93.0	560.5
2050	169.8	126.1	248.8	49.7	25.8	120.3	740.4
2075	178.2	120.1	352.2	92.4	35.1	121.4	899.4
türte imposition							
2000	77.1	35.7	70.7	26.9	0.1	57.5	268.0
2025	56.5	66.5	69.9	48.7	19.5	92.8	353.8
2050	70.4	84.0	82.8	67.1	35.0	103.9	443.2
2075	75.6	90.7	110.7	117.0	45.0	122.9	561.9
	Émission de dioxyde de carbone (10^6 tonnes de carbone par an)						
	Pétrole classique	Huile de schiste	Pétrole de synthèse	Charbon	Gaz de synthèse	Gaz	Total
Scénario de référence							
2000	2 544.1	0.0	14.4	3 081.0	0.1	668.2	6 307.9
2025	2 663.8	5.5	218.9	3 394.5	2.2	284.3	7 569.1
2050	3 003.1	21.3	568.6	4 301.5	37.8	702.6	9 634.8
2075	3 023.5	40.7	1 057.4	5 786.6	211.1	622.7	11 741.9
türte imposition							
2000	1 394.6	0.0	25.2	1 301.1	0.1	485.6	3 206.6
2025	994.3	0.0	220.9	830.3	0.4	897.8	2 943.7
2050	1 263.2	0.0	241.7	805.2	4.1	134.1	3 448.2
2075	1 361.0	4.9	365.2	1 089.2	10.8	1 225.5	4 056.6

1. Taxes à la consommation de 50 pour cent sur le gaz, 100 pour cent sur le pétrole et 150 pour cent sur le charbon, imposées en l'an 2000.

Source: Cline (1989).

Cline (1989), indiquent, pour le premier, l'évolution de la part relative des différentes formes d'énergie et, pour le second, l'ensemble de l'énergie consommée.

Lien entre l'ensemble de l'énergie consommée et la production totale. Le rapport entre l'ensemble des intrants énergétiques et la production globale n'est pas fixe, comme le montre la baisse, supérieure à 20 pour cent, de l'intensité

énergétique totale survenue entre 1970 et la fin des années 80. L'augmentation du prix relatif de l'ensemble des intrants énergétiques est de nature à entraîner un processus de substitution entre l'énergie et d'autres moyens de production, notamment le travail et le capital. Cependant, on peut raisonnablement penser que ceux-ci, et c'est particulièrement vrai pour le capital, seraient moins avantageux en raison des possibilités limitées de substitution. Un bon nombre d'études évoquent une éventuelle relation de complémentarité entre l'énergie et le capital pour la production, du moins dans certains secteurs. Dans ce cas, la hausse du prix de l'énergie aurait pour effet de réduire le taux de rendement du capital et de l'épargne, et par conséquent de diminuer l'accumulation de capital et la croissance. La plupart des modèles étudiés se fondent sur des élasticités de substitution à long terme de l'ordre de 0.5 entre l'énergie et l'ensemble des autres moyens de production[13].

Certains auteurs optent pour une autre démarche en étayant leur modèle sur l'hypothèse d'un ((effet de rétroaction de l'énergie» sur la croissance globale lié à la hausse des prix de l'énergie. Ils estiment que cet effet recouvre toutes les répercussions de l'évolution des prix de l'énergie sur le PNB global, dans un sens négatif pour les pays réalisant des importations énergétiques nettes et positif pour ceux qui exportent de l'énergie. C'est ainsi que Reilly *et al.* (1987) et l'AIE (1990) postulent qu'une hausse de 10 pour cent du prix relatif de l'énergie entraîne à long terme dans les pays de l'OCDE une réduction du PIB de 1.5 pour cent environ par rapport au niveau de référence.

Si les prix des combustibles fossiles augmentent fortement, les coûts d'ajustement risquent d'être plus élevés à court terme car le capital est étroitement lié à des secteurs donnés et le réaménagement de l'équipement existant entraîne de lourdes dépenses. Les études comportant une modélisation de l'accumulation du capital posent explicitement comme hypothèse qu'à court terme, soit les facteurs de production sont substituables, soit le capital est inséparable de secteurs donnés (Nordhaus, 1990*b*).

L'amélioration du rendement énergétique revêt également une certaine importance pour le rapport entre énergie et production. Dans la quasi-totalité des modèles, le rendement énergétique est considéré comme un paramètre exogène. On pourrait cependant objecter que l'augmentation du rendement énergétique est en partie endogène en ce sens qu'elle est suscitée par l'évolution des prix relatifs. Mintzer (1987), par exemple, postule que les progrès techniques liés à l'énergie seront d'autant plus importants que les prix relatifs des combustibles fossiles seront plus élevés (l'accroissement escompté du rendement énergétique passerait ainsi de 0.8 à 1.5 pour cent par an).

La dynamique de l'ajustement global dépend par ailleurs des anticipations. L'hypothèse que les producteurs et les consommateurs adopteront un comportement optimal dicté par une prévision parfaite des futurs prix de l'énergie finale

aboutira à un coût global à long terme plus faible que dans le cas d'un modèle qui table sur l'imprévision, du fait que les agents économiques prévoient leurs achats en tenant compte des mesures annoncées pour l'avenir. De même, le profil simulé de la consommation des ménages dépendra de la voie particulière suivie pour réduire les émissions dans les modèles qui postulent un comportement optimal dicté par une prévision parfaite (Blitzer ***et al.,*** 1990).

Les termes ***de l'échange*** pourraient largement affecter les flux d'ensemble des revenus. L'adoption de mesures unilatérales par des pays importateurs d'énergie pourrait conduire à une détérioration de leur balance des paiements, tout effort accompli dans le sens de l'équilibre supposant un transfert réel de ressources en direction d'autres pays. Les initiatives internationales, en revanche, sont de nature à susciter une redistribution importante des revenus entre les régions, en particulier parce que les ressources en combustibles fossiles ne sont pas réparties également dans le monde et que les taux d'utilisation et de tarissement des différents combustibles seront affectés. C'est ainsi que les prix à la production des combustibles fossiles pourraient connaître un recul sensible et définitif au-dessous du niveau de référence dans l'éventualité d'une action mondiale, les termes de l'échange devenant ainsi plus favorables aux pays importateurs de combustibles fossiles.

Les simulations de Whalley et Wigle (1990) mettent en lumière l'importance des incidences des termes de l'échange et des modifications de la structure des échanges qui peuvent accompagner différentes politiques : elles montrent les effets d'une réduction des émissions de 50 pour cent à l'échelle mondiale obtenue grâce à:

i) une taxe à la production sur le carbone percue par les autorités nationales ;
ii) une taxe à la consommation sur le carbone percue par les autorités nationales ;
iii) une taxe mondiale sur le carbone percue par un organisme international et redistribuée en fonction du nombre d'habitants; et
iv) des taxes nationales à la consommation visant une réduction globale de 50 pour cent et, parallèlement, une consommation uniforme de combustibles fossiles par habitant.

Les pertes entraînées en termes de bien-être, à l'échelle mondiale et régionale, seraient très variables. Dans le cas d'une taxe prélevée par les producteurs de combustibles fossiles, les pays exportateurs de pétrole bénéficieraient d'avantages importants, tandis que de lourdes pertes affecteraient les pays en développement (tableau 8). Dans le cas d'une taxe prélevée dans les pays consommateurs, les pays exportateurs de pétrole subiraient les pertes les plus importantes, alors que les pays de la CEE et le Japon pourraient tirer quelque avantage. Si un mécanisme d'échange de droits d'émission était mis en place, les recettes fiscales

étant redistribuées par un organisme international selon une formule favorable aux pays à faible revenu, les pertes en termes de bien-être frapperaient lourdement les pays exportateurs de pétrole et les États-Unis, alors que d'autres pays à revenu élevé enregistreraient une perte relative et les pays en développement un gain

Tableau **8. Evolution du bien-être au niveau régional en fonction des politiques**

Réduction globale des émissions de 50 pour cent en moyenne pour la période 1990-2030

	Modification du bien-être[1] (%)	Recettes produites durant la période 1990-2030 (billions de dollars, prix de 1990)
1. ***Taxes nationales à la production***		
CEE	–4.0	3.3
Amérique du Nord	-4.3	11.0
Japon	–3.7	0.1
Pays exportateurs de pétrole	4.5	9.4
Pays en développement	–7.1	21.7
Ensemble du monde	-4.4	46.6
2. ***Taxes nationales à la consommation***		
CEE	1.4	6.7
Amérique du Nord	–1.2	12.4
Japon	3.0	2.0
Pays exportateurs de pétrole	–16.7	2.5
Pays en développement	-4.5	21.9
Ensemble du monde	–2.1	46.7
3. ***Taxe mondiale à la production: redistribution proportionnelle à la populaton de chaque région***		
CEE	–3.8	–3.2[1]
Amérique du Nord	–9.8	–9.1[1]
Japon	-0.9	–0.6[2]
Pays exportateurs de pétrole	–13.0	–1.52
Pays en développement	1.8	12.02
Ensemble du monde	-4.2	[2]
4. ***Plafond démission par tête***		
CEE	–6.4	
Amérique du Nord	–18.6	
Japon	–2.5	
Pays exportateurs de pétrole	–15.1	
Pays en développement	–1.2	
Ensemble du monde	–8.5	

1. Variation au sens de Hicks sur la période 1990-2030, aux prix de 1990, en pourcentage du PIB à sa valeur actuelle.
2. Transfert net entre régions; le total des recettes fiscales perçues représente 46.3 billions de dollars.

Source: Whalley et Wigle (1990).

relatif. Enfin, dans le cas de la fixation d'un plafond visant à égaliser les niveaux d'émissions par habitant d'un pays à l'autre, on pourrait constater une légère perte de bien-être dans les pays à faible revenu, une perte assez importante dans les pays à revenu élevé et, une fois de plus, le recul serait marqué dans les pays exportateurs de pétrole. Par rapport à celle qu'entraînerait une taxe nationale à la consommation, la perte de bien-être pourrait être quinze fois plus importante pour l'Amérique du Nord et quatre fois plus importante pour l'ensemble du monde. La différence notable à l'échelle mondiale témoigne avant tout du fait qu'il s'agit du mécanisme de réduction le plus éloigné d'une solution efficiente, tous les consommateurs se voyant imposer une même taxe sur le carbone en cas d'utilisation de combustibles fossiles. La taxe sur le carbone (implicite) serait la plus faible et s'appliquerait de manière égale d'une région à l'autre dans le cas d'un échange de droits d'émission, tandis qu'elle serait relativement plus élevée et varierait peu dans le cas de taxes à la consommation et à la production. Elle atteindrait un niveau bien plus élevé et varierait sensiblement d'une région à l'autre dans l'éventualité d'un plafond uniforme d'émissions par habitant.

Aspects régionaux. Si Manne et Richels (1990) ne proposent pas de solution mondiale parfaitement cohérente, parce que les régions étudiées ne sont pas liées par des échanges, leur modèle n'en donne pas moins un éclairage appréciable sur les problèmes de croissance auxquels pourraient se heurter les pays en développement à la suite de fortes réductions d'émissions. Dans l'hypothèse d'une croissance rapide de la production et des émissions dans les pays en développement, il serait pratiquement impossible de fixer un plafond absolu pour les émissions annuelles. En admettant que, par rapport à l'année de référence, les quantités annuelles émises d'ici 2 100 par la Chine et d'autres pays en développement soient multipliées par deux, le recul de la production serait bien plus marqué que dans les pays développés, qui, en principe, se verraient appliquer une réduction d'émissions de 20 pour cent par rapport à l'année de référence. La perte de production serait assez importante pour la Chine (6 pour cent du PIB en 2100), même si ce pays était autorisé à multiplier ses émissions par cinq. L'étude de Blitzer ***et al.*** (1990) fait également apparaître de lourdes pertes de production pour un autre pays en développement (l'Egypte). Compte tenu du nombre limité d'études empiriques, à long terme, les valeurs des paramètres pour ces pays sont moins fiables que celles dont on dispose pour les pays développés. L'utilisation inefficace des ressources énergétiques, en particulier dans les économies planifiées, offre sans doute la possibilité de réduire dans de très fortes proportions la quantité de combustibles fossiles consommée par unité produite.

L'étude réalisée par Edmonds et Barns (1990) met en évidence l'impossibilité pour les pays de l'OCDE de réduire à eux seuls, par rapport aux niveaux relevés en 1988, la quantité de CO_2 émis ***dans*** le ***monde*** de 20 pour cent d'ici 2005 (objectif fixé à Toronto) et de 50 gour cent d'ici 2025. Même l'arrêt complet de la consommation de combustibles fossiles dans les pays de l'OCDE

serait encore insuffisant pour compenser le dépassement dans les autres pays des limites fixées pour les émissions de CO_2.

Résultats contrastés selon le type de modèle. L'étude effectuée par le CBO (Congressional Budget Office, **1990**) recourt à deux modèles différents pour faire ressortir les effets d'une redevance éventuelle de 100 dollars par tonne de carbone sur l'économie des États-Unis : un macro-modèle multi-sectoriel (DRI) et un modèle dynamique d'équilibre général (DGEM). Le premier, qui prévoit des possibilités limitées de substitution entre les procédés de production, révèle des effets macro-économiques plus importants. Les substitutions sont principalement liées à une désaffection de la demande finale vis-à-vis des biens à forte intensité énergétique. Le second modèle, en revanche, suppose beaucoup plus de souplesse dans le processus d'ajustement à la hausse des prix de l'énergie, ne prend pas en compte une partie des coûts supportés durant la période de transition et aboutit à des réductions d'émissions bien plus importantes pour une taxe identique.

Taxes sur le carbone et autres moyens d'intervention. Les scénarios qui figurent dans le plan national pour l'environnement des Pays-Bas (NEPP, 1989) comportent diverses mesures non fiscales. Dans le premier scénario, des réductions de CO_2 unilatérales relativement accusées jusqu'en 2010 entraîneraient un recul du taux de croissance de 0.2 point de pourcentage. Si des initiatives comparables étaient prises dans des pays concurrents (hypothèse du deuxième scénario), la situation serait très différente, et on avance dans l'étude du NEPP qu'un effet positif sur la croissance serait même envisageable. Selon cette étude, les émissions seraient réduites non pas au moyen d'une taxe sur le carbone, mais grâce à un ensemble de mesures, parmi lesquelles une réglementation sur les économies d'énergie dans les habitations et dans les bâtiments industriels, visant à accroître le rôle de la production combinée de chaleur et d'électricité, favoriser l'exploitation maximale de sources d'énergie renouvelables, réduire la consommation de charbon et de pétrole, inciter à délaisser la voiture particulière au profit des transports publics et de la bicyclette, auxquelles s'ajoutent des dispositions telles que la réduction des aides financières au titre des déplacements journaliers et les redevances routières. De toute évidence, il est difficile de modéliser les effets d'une réglementation sur la production globale et, en l'absence d'une analyse de sensibilité, d'apprécier la fiabilité de ces estimations. On peut encore' tirer une leçon importante: les émissions pourraient dans un premier temps être réduites à peu de frais si les politiques sectorielles en vigueur ne sont pas optimales. En modifiant les politiques dans les domaines des transports et de l'énergie, on pourrait opérer «à bon compte» une première série de réductions des émissions de CO_2.

D'autres études montrent que la démarche consistant à appliquer une réglementation plutôt qu'une taxe sur le carbone pour réduire les émissions serait coûteuse. Nordhaus (**1990*b***) avance par exemple que l'emploi de mécanismes

réglementaires pourrait entraîner une baisse supplémentaire de la croissance de la production égale à 0.25 pour cent si les émissions étaient réduites de 60 pour cent. Blitzer ***et a/.*** (1990) exposent les résultats d'une simulation selon laquelle les objectifs en matière d'émissions ne sont pas définis uniformément pour l'ensemble de l'économie, mais secteur par secteur. La perte de souplesse se traduit dans le deuxième cas, comparativement au premier, par une augmentation sensible des coûts économiques.

Les simulations de Jorgenson et Wilcoxen (1990) se rapportent également à des scénarios de réduction prévoyant d'autres formes d'imposition que les taxes sur le carbone. Si la taxe est liée à la capacité énergétique (assise sur le pouvoir calorifique), le coût global à supporter pour atteindre un objectif donné augmente légèrement, tandis que si elle est appliquée aux sources primaires au prorata de la valeur, le coût global augmente de manière notable (il serait doublé dans le cas d'une réduction d'émissions de 20 pour cent). Les coûts d'ensemble sont plus élevés parce que ces taxes ne visent pas aussi expressément la teneur en carbone des différents combustibles.

Autres aspects des politiques envisagées. Le coût global correspondant à la baisse de production peut être grandement influencé par la manière dont les recettes fiscales accrues sont redistribuées entre les pays. Cette question n'est abordée que par l'étude norvégienne SIMEN (Bye ***et al.,*** 1989), dans laquelle on envisage une réaffectation du produit des taxes. La politique adoptée reste sans incidence budgétaire si elle prévoit une réduction des taxes sur le travail et sur le capital. En l'absence de données ou d'analyse de sensibilité, on n'en connaît pas les effets sur l'offre de travail et de capital.

Glomsrod ***et al.*** (1990) évaluent également les avantages liés à une utilisation réduite de combustibles fossiles due à une réduction d'autres polluants, tels que le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et les particules. Les quantités émises diminueraient jusqu'à atteindre approximativement les émissions de CO_2. L'adoption de mesures unilatérales visant le CO_2 n'aurait quasiment aucun intérêt pour limiter le réchauffement mondial, mais la diminution des autres polluants atténuerait les atteintes à l'environnement au niveau local. Les calculs effectués pour cette étude indiquent que les avantages obtenus grâce à la réduction de polluants autres que le CO_2 ainsi que les bénéfices dus à une politique de la circulation, à savoir une lutte contre le nombre d'accidents et le niveau sonore, compenseraient environ les deux tiers de la perte de PIB due au plafonnement des émissions de CO_2.

C. Solutions reposant sur la sylviculture

Le déboisement des forêts tropicales, en particulier la forêt humide d'Amazonie, joue un rôle important dans l'émission de CO_2 : selon les estimations, les rejets de carbone représentent entre 0.5 et 3 milliards de tonnes par an

(Nordhaus, 1990*a*), à comparer aux *6* milliards de tonnes liées à la consommation actuelle de combustibles fossiles. De nombreux observateurs estiment que, dans une large mesure, le déboisement n'est pas économiquement rationnel et tient principalement à l'absence de droits de propriété attachés aux forêts humides. Si tel est le cas, on pourrait donc diminuer sensiblement les émissions pour un coût économique peu élevé en mettant un terme au déboisement.

Nordhaus (1990 et 1990*a*) objecte que le *reboisement* – à distinguer d'un simple *arrêt du déboisement* – risque fort d'être coûteux. Il propose des estimations correspondant à trois formules :

i) Attribution d'une aide financière pour l'exploitation du bois et autres activités forestières, qui diminuerait le prix du bois employé comme matière première et en élargirait l'utilisation. Cette aide financière, qui pourrait atteindre *1*00 dollars par tonne de carbone, permettrait d'absorber jusqu'à *280* millions de tonnes de carbone par an.

ii) Reboisement des zones découvertes, solution permettant d'absorber 200 millions de tonnes de carbone par an. Son coût, par tonne de carbone, pourrait aller de 40 dollars pour les terres bon marché des régions tropicales à *115* dollars pour les terres marginales des États-Unis.

iii) Mise en œuvre d'un programme de « mise hors production des arbres)) consistant à acheter et à stocker le bois sur pied. Cette formule est la moins attrayante des trois puisque son coût pourrait aller jusqu'à *500* dollars par tonne de carbone pour des niveaux peu élevés d'absorption.

Blok *et al.* (1989) estiment le coût du reboisement à 0.7 dollar seulement par tonne de carbone, soit beaucoup moins que le chiffre avancé par Nordhaus. Ces différences s'expliquent par le fait que l'estimation de Nordhaus prend en compte le coût des terrains et les frais d'administration. En outre, la quantité de carbone éliminé par hectare et par an est évaluée à *1.6* tonne seulement par Nordhaus, alors qu'elle est quatre fois plus importante selon les estimations de Blok *et al.*

Les compagnies d'électricité néerlandaises ont récemment présenté un projet visant à reboiser une superficie de *10* 000 hectares par an en Amérique du Sud. Elles en estiment le coût annuel à 40 millions de florins et comptent qu'aux Pays-Bas, un programme comparable coûterait huit fois plus cher (*Het Financiele Dagblad, 1990).* Si on retient le faible taux d'élimination calculé par Nordhaus, on constate que le coût évalué par les compagnies d'électricité néerlandaises coïncide avec le chiffre qu'il avance pour des terrains bon marché situés dans des régions tropicales, à savoir environ 40 dollars par tonne de carbone. D'après les estimations de Dixon *et al,* (1990), le coût serait de 4 à *8* dollars par tonne de carbone, pour un coût de plantation de *1* 600 dollars et un taux annuel d'absorption de *20* à 40 tonnes par hectare.

Selon Sedjo (1990), avec un taux d'absorption de 6 tonnes de carbone par hectare environ, la quantité nette de CO_2 émis aujourd'hui par suite des activités humaines, estimée à 3 milliards de tonnes, exigerait un reboisement sur 465 millions d'hectares. Compte tenu du coût actuel des terrains et des opérations de plantation, il en coûterait pour une telle superficie 186 milliards de dollars dans les régions tropicales et 372 milliards aux États-Unis.

Les estimations relatives au reboisement représentent un éventail très large. En outre, elles sont toutes incomplètes et ne prennent pas en compte les effets qu'auraient des programmes de reboisement à grande échelle sur le prix des terrains et du bois.

D. Coût de la réduction des émissions de CFC

La limitation des émissions de CFC revêt une importance particulière car ces gaz provoquent l'effet de serre le plus intense et affectent en outre la couche d'ozone. La production de CFC a connu un développement rapide durant les dernières décennies. Sans l'adoption de mesures d'intervention, cette tendance se serait vraisemblablement confirmée à l'avenir (Mintzer, 1987).

Pour donner suite au Protocole de Montréal, une centaine de pays, parmi lesquels l'URSS, l'Inde et la Chine, ont signé un accord à Londres, entré en vigueur en juillet 1990, par lequel ils s'engagent à réduire les émissions de substances chimiques qui appauvrissent la couche d'ozone. L'accord de Londres prévoit un calendrier pour le retrait progressif des CFC les plus préjudiciables d'ici l'an 2000. Certains pays ont fait savoir qu'ils avancaient la date limite de ce retrait à 1997.

On peut réduire les émissions de CFC en recourant à des produits de remplacement dont certains ont une capacité de rayonnement moindre ou nulle. Certains de ces produits étant relativement bon marché, il est donc possible d'obtenir une forte réduction pour un coût assez faible comparé au coût engendré par de fortes réductions des autres gaz à effet de serre. L'évaluation économique officielle consécutive à l'accord de Montréal, malgré son caractère limité, montre que les produits de remplacement disponibles sont bon marché pour la plupart des applications (PNUE, 1989). Nordhaus (1990) estime qu'en imposant une taxe d'un montant peu élevé, 5 dollars par tonne d'équivalent CO_2, le réchauffement par effet de serre imputable aux émissions de CFC diminuerait de plus des deux tiers. Au-delà de ce stade, le taux d'imposition augmenterait rapidement. Récemment, Smith et Vodden (1989) ont estimé les dépenses qu'aurait à supporter le Canada pour respecter les dispositions du Protocole de Montréal. A partir des courbes de coûts réalisées par l'USEPA (Agence américaine pour la protection de l'environnement), ils ont estimé que pour la période 1989-2075, le coût social s'élèverait, en valeur actuelle, à 0.2 milliard de dollars canadiens. Pour réduire de

50 pour cent les émissions de CFC aux États-Unis (pour la période 1979-2100). Bailey (1982) avait auparavant calculé une valeur actuelle nette de l'ordre de 0.2 à 2.2 milliards de dollars (dollars de 1978). La moyenne est donc de 0.6 milliard de dollars, soit un pourcentage négligeable du PIB. Bailey a toutefois mis en évidence une hausse rapide des coûts à partir d'une réduction supérieure aux deux tiers. Le coût de la réduction des émissions de CFC n'est cependant pas du même ordre de grandeur que celui de la réduction des émissions de CO_2, et quand bien même les CFC n'auraient pas d'effet perceptible sur la couche d'ozone, ils seraient les premiers visés quel que soit le type de mesure envisagée pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

NOTES

1. Dans toutes les études, le terme « coût » sert à exprimer les pertes affectant le PIB ou la consommation par rapport aux scénarios de référence du fait des mesures de prévention. Cependant, aucun des scénarios de référence ne donne d'estimation des coûts et avantages liés au changement climatique ou d'autres externalités imputables à la consommation accrue de combustibles fossiles. Il ne s'agit donc pas à proprement parler de « coût » si ces externalités se confirment ou sont appelées à augmenter à l'avenir. Par ailleurs, les mesures préventives peuvent jusqu'à un certain point apporter des améliorations en termes de bien-être. L'aspect économique des externalités liées à l'environnement est replacé dans un cadre plus large, évoqué dans le présent volume, par Nicolaisen, Dean et Hoeller (1991).
2. Par ((technique régulatrice », on entend une technique nouvelle ou non encore éprouvée qui sera largement accessible à l'avenir (sans peser sur les ressources naturelles) et permettra donc de limiter la progression ultérieure du prix des ressources existantes.
3. Concernant des analyses d'équilibre partiel, voir par exemple les travaux de Chandler (1990), qui étudie les mesures prises dans le domaine de l'énergie par huit pays, une étude comparable effectuée par Capros et al. (1990). un rapport à l'intention de la Commission des Communautés européennes (1990), ainsi que l'étude réalisée par Ingham et Ulph (1990), plus particulièrement consacrée au secteur manufacturier du Royaume-Uni.
4. Le Secrétariat de l'OCDE achève actuellement des travaux concernant un modèle dynamique appliqué d'équilibre général, le modèle « GREEN ». Suffisamment détaillé du point de vue sectoriel et du point de vue régional, ce modèle peut servir à traiter la plupart des questions abordées ici et vise plus particulièrement à cerner les points soulevés par l'élaboration d'accords internationaux portant sur le rapport coût-efficacité.
5. On dispose à présent d'un grand nombre de scénarios d'émissions de CO_2 liées aux combustibles fossiles (voir l'étude antérieure de Nordhaus et Yohe, 1983). Seuls sont examinés ici les cas pour lesquels il existe également des scénarios de réduction, ainsi que les études effectuées par Reilly et al. (1987), d'une part, et Nordhaus et Yohe (1983), d'autre part, qui sont axées sur la distribution de probabilités des scénarios d'émissions.
6. Certains auteurs proposent également des scénarios de référence ((écologiques», qui supposent un renforcement régulier des normes d'environnement pour des raisons autres que l'effet de serre (Bergman, 1990) et aboutissent à des augmentations de prix provoquées par les mesures d'intervention. Du fait que les mesures envisagées dans ces scénarios ont pour principaux objectifs une consommation de charbon réduite, une circulation routière moins dense, ou, plus généralement, une augmentation des prix de l'énergie, les émissions de CO_2 sont moins importantes.
7. L'épuisement des réserves de pétrole et de gaz risque cependant de susciter l'exploitation d'autres sources de combustibles fossiles à forte teneur en carbone.
8. Barbier et al. (1990) passent en revue les techniques régulatrices disponibles et leurs prix.

9. L'estimation avancée par Reilly *et* a/. (1987), à savoir une augmentation de 50 pour cent seulement d'ici 2075, est particulièrement intéressante puisqu'elle résulte d'une démarche permettant de calculer la distribution de probabilités des futures émissions (méthode de Monte-Carlo).

10. Face à la menace du changement climatique, on peut recourir à des techniques climatiques, qui ne sont pas développées ici. Plusieurs formules ingénieuses ont été proposées, consistant par exemple à faire flotter du latex à la surface des océans, à peindre les toits en blanc ou à augmenter les substances nutritives destinées aux algues dans les océans, ce qui devrait accélérer l'absorption de carbone. Pour l'instant, la faisabilité et l'efficacité de ces solutions sont incertaines, de même que les estimations de coût. L'extraction du CO_2, choix techniquement réalisable, risque d'être coûteuse. Blok *et* a/. (1989) estiment que l'extraction du CO_2 rejeté par les cheminées et son évacuation coûteraient entre 30 et 62 florins par tonne de dioxyde de carbone. Les coûts d'évacuation augmenteraient sans doute sensiblement une fois que les installations bon marché de stockage de CO_2 arriveraient à saturation.

11. La Suède, la Finlande et les Pays-Bas ont récemment décidé d'appliquer des taxes sur le carbone dont les montants respectifs sont de 11 dollars, 6.5 dollars et 1.5 dollar par tonne de carbone.

12. Les réductions d'émissions de CO_2 révélées par les résultats nationaux peuvent être trompeuses car il est probable que les produits à forte intensité énergétique seront importés.

13. L'évolution de l'intensité énergétique globale (à savoir les besoins totaux de combustibles fossiles par unité de PIB) donne une indication sommaire des hypothèses retenues dans les différents modèles quant à l'adaptabilité du rapport entre l'ensemble de l'énergie consommée et le PIB total. Bergman (1988) fournit une analyse de sensibilité de ce rapport à des chocs sur les prix énergétiques globaux, mais ne l'étend pas aux taxes sur le carbone.

Annexe

L'EFFET DE SERRE

Le climat de la Terre est déterminé par un ensemble complexe de facteurs. Parmi ceux-ci, on peut citer l'« effet de serre» dû à la présence de gaz qui piègent la chaleur dans les basses couches de l'atmosphère. L'expression elle-même tient à ce que les « gaz à effet de serre)) (GES) agissent comme un couvercle empêchant la chaleur (le rayonnement infrarouge) de s'échapper de l'atmosphère terrestre, tout comme les vitres retiennent la chaleur à l'intérieur d'une serre. Le fait que la température du globe est déjà assez clémente s'explique par la présence naturelle de GES. Si les concentrations sont relativement faibles dans l'atmosphère – les GES entrent pour moins de 0.05 pour cent dans sa composition – la quantité de chaleur qui s'en échappe diminue sensiblement et les températures augmentent à la surface de la Terre (Schneider, 1989). Bien que ces phénomènes aient été abondamment étudiés durant les années écoulées, de nombreuses incertitudes scientifiques demeurent, de sorte qu'il reste impossible de déterminer avec exactitude l'ampleur et les incidences du « réchauffement par effet de serre» apparemment imputable à l'augmentation des GES produits par les activités humaines.

Le dioxyde de carbone (CO_2) est le principal GES. Viennent ensuite d'autres GES importants, les hydrocarbures chlorofluorés (CFC), le méthane (CH_4) et l'hémioxyde d'azote (N_2O). La première source d'émissions anthropiques de GES est l'utilisation de combustibles fossiles, responsable d'après les estimations de 55 à 80 pour cent environ de la quantité nette de CO_2 émis dans l'atmosphère par suite des activités humaines (le reste provenant dans une large mesure du déboisement) ; cette combustion joue également un rôle essentiel dans l'émission de N_2O et peut-être de méthane (AIE, 1989). Parmi les GES, seuls les CFC n'ont aucun lien avec l'utilisation de combustibles fossiles.

La quantité de CO_2 émis lors de l'utilisation de combustibles fossiles est faible par rapport à celle que le cycle naturel du carbone fait disparaître ou circuler par le biais de réceptacles naturels tels que les océans, la biosphère et l'atmosphère. Au total, on compte chaque année environ 6 milliards de tonnes de carbone rejetées lorsque des combustibles fossiles sont brûlés, tandis que la quantité brute d'émissions représente 200 milliards de tonnes et qu'au total, le stock de carbone atmosphérique atteint approximativement 700 milliards de tonnes. La proportion des émissions de carbone anthropiques qui demeurent dans l'atmosphère sans être absorbées par des réceptacles naturels est évaluée à 60 pour cent environ (Darmstadter et Edmonds, 1989).

Concernant les autres GES, le lien entre les quantités émises et les concentrations entraînant un effet de serre est encore plus complexe et relativement mal connu. Dans le cas de GES chimiquement instables comme les CFC, le N_2O, l'ozone et la vapeur d'eau, le phénomène se caractérise par l'intervalle nécessaire pour que les gaz en question soient dissociés et perdent

leur aptitude à provoquer un effet de serre. C'est ainsi qu'une augmentation des concentrations de CFC est à prévoir seulement tant que les quantités nettes émises dépassent les quantités nettes de CFC atmosphériques qui se transforment chimiquement en composés dépourvus d'effet de serre. Le tableau A l de l'annexe donne un relevé succinct des concentrations actuelles de différents GES et des niveaux correspondants pour l'ère pré-industrielle. Pour le CO_2, par exemple, les valeurs ont augmenté de 26 pour cent depuis la fin du 18e siècle. Du fait que la durée de vie des GEÇ et leur capacité de rayonnement varient, on peut concevoir un indice de capacité de réchauffement par effet de serre qui prenne en compte les différentes propriétés des GES. Dans le tableau A2 de l'annexe, on met en évidence ces propriétés en comparant, pour divers intervalles de temps, la capacité de réchauffement d'un kilogramme de chaque gaz et celle d'un kilogramme de dioxyde de carbone, et on trouve dans le tableau A3 de l'annexe les effets relatifs cumulés sur le climat des émissions anthropiques survenues en 1990. Si le CO_2 a une moindre capacité de rayonnement comparé à celle des autres gaz, les quantités émises sont beaucoup plus importantes, si bien que la part relative du CO_2 dans le réchauffement par effet de serre avoisine 60 pour cent.

Selon l'IPCC (1990). les températures moyennes de la surface terrestre pourraient augmenter de 1°C d'ici 2025 en l'absence de mesures de contrôle, et enregistrer une hausse supplémentaire de 2°C avant la fin du 21e siècle – bien qu'il souligne l'importance de la marge d'incertitude qui entoure ces estimations. En comparant les niveaux de l'ère pré-industrielle et les niveaux actuels, on estime généralement que la capacité de réchauffement serait de 1.5°C à 4.5°C d'ici la fin du siècle prochain. Cette large fourchette tient aux incertitudes concernant les émissions à venir et les futures rétroactions provenant des océans, des nuages et autres écosystèmes. Les échéances qui risquent de marquer un doublement des concentrations de GES varient selon les études examinées ici, puisqu'elles vont de 2030 (Mintzer, 1987) à 2060 environ (IPCC, 1990), voire jusqu'au-delà de 2075 (Edmonds et Reilly, 1987). En replaçant les hausses estimées dans un contexte historique plus large, on constate que les températures

Tableau A l. **Apercu des principaux gaz à effet de serre liés à des activités humaines**

	Dioxide de carbone	Méthane	CFC-11	CFC-12	Hémioxide d'azote
Concentration atmosphérique	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv
Époque pré-industrielle (1750-1800)	280	0.8	0	0	288
Époque actuelle (1990)	353	1.72	280	484	310
Taux actuel d'évolution par an	1.8 (0.5%)	0.015 (0.9%)	9.5 (4%)	17 (4%)	0.8 (0.25%)
Durée de vie moyenne dans l'atmosphère (en années)	50-200'	10	65	130	150

ppmv = parties par million par volume;
ppbv = parties par milliard par volume;
pptv = parties par billion par volume.

1. La manière dont le CO_2 est absorbé par les océans et la biosphère est complexe et ne peut être exprimée au moyen dune valeur unique bien déterminée.

Source: IPCC (1990).

moyennes du globe ont connu des fluctuations atteignant 10°C en 160 000 ans et une augmentation de 0.3 à 0.7°C au cours des 100 dernières années. Si cette augmentation ne peut être attribuée avec certitude à l'effet de serre, elle concorde avec les modélisations du changement climatique provoqué par les GES, compte tenu du manque de connaissances sur le décalage entre l'absorption des GES par l'océan et l'absorption de chaleur et sur l'effet des modifications de la couverture nuageuse (Houghton et Woodweli, 1989; EPA, 1989; Solow, 1990; et IPCC, 1990).

Tableau **A2. Possibilités de réchauffement mondial'**

	Horizon		Origine des émissions
	2010	2090	
Dioxyde de carbone	1	1	Utilisation de combustibles fossiles, pour une large part. Déboisement.
Méthane (utilisations indirectes comprises)	63	21	Utilisation de combustibles fossiles et très large éventail d'activités agricoles et biologiques.
Hémioxyde d'azote	270	290	Application d'engrais et consommation énergétique.
CFC-11	4 500	3 500	Origine entièrement industrielle, aérosols et autres.
CFC-12	7 100	7 300	
HCFC-22	4 100	1 500	

1. Capacité de réchauffement liée à l'émission d'un kilogramme de chaque gaz étudié rapportée à celle d'un kilogramme de CO_2. Les chiffres donnés ici correspondent aux meilleures estimations possibles *en* fonction de la composition actuelle de l'atmosphère.

Source: IPCC (1990).

Tableau **A3. Effet cumulé sur le climat des différents types d'émission anthropiques produites en 1990**

	Pouvoir de réchauffement par effet de serre (intervalle de 100 ans)	Quantités émises en 1990	Part relative sur 100 ans
Dioxyde de carbone	1	26 000'	61 %
Méthane'	21	300	15 %
Hémioxyde d'azote	290	6	4 %
CFC	Variable	0.9	11 %
HCFC-22	1 500	0.1	0.5 %
Autres'	Variable		8.5 %

1. 26 000 Tg (téragrammes) **de dioxyde** de carbone = 7 000 Tg (soit 7 gigatonnes) **de** carbone.
2. Ces valeurs couvrent les répercussions indirectes de ces émissions sur d'autres gaz à effet de serre par **le** biais de réactions chimiques dans l'atmosphère. Ces estimations, qui varient grandement, d'un modèle **a** l'autre, devraient être considérées comme provisoires **et** pouvant être modifiées. L'effet estimé de l'ozone est pris en compte dans la catégorie « autres ».

Source: IPCC (1990).

BIBLIOGRAPHIE

AIE (19901, Suivi de la Conférence Noordwijk Ministerial sur: « Atmospheric Pollution and Climate Change», (AIE/SLT(90)2), Paris.

AIE (1989), ***L'énergie et l'environnement: vue d'ensemble des politiques,*** Paris.

Barbier, E.B., J.C. Burgess et D.W. Pearce (1990), « Slowing global warming: options for greenhouse gas substitution», London Environmental Economics Centre, polycopié.

Bergman, L. (1989), ***Tillväxt och miljö en studie av malkonflikter,*** Bilaga 9 till Langtidsutredningen 1990, Finansdepartementet, Stockholm.

Bergman, L. (1988), « Energy policy modeling : a survey of general equilibrium approaches », ***Journal*** of ***Policy Modeling,*** 10(3), pp. 377-399.

Blitzer, C., R.S. Eckaus, S. Lahiri et A. Meeraus (1990). « A general equilibrium analysis of the effects of carbon emission restrictions on economic growth in a developing country)), polycopié, (janvier).

Blok, K., C.A. Hendriks et W.C. Turkenberg (1989), « The role of carbon dioxide removal in the reduction of the greenhouse effect», dans AIE, ***Energy Technologies for Reducing Emissions*** of ***Greenhouse Gases,*** Compte-rendu d'un séminaire d'experts, vol. 2, Paris.

Bodlund, B., E. Miller, T. Karlsson et T.B. Johansson (1989), « The challenge of choice: technology options for the Swedish electricity sector», dans T.B. Johansson, B. Bodlund and R.H. Williams (dir. pub.), ***Electricity End-use and New Generation Technologies, and their Planning Implications,*** Lund, **pp.** 883-947.

Bye, T., B. Bye et L. Lorentsen (1989), « Studies of industry, environment and energy towards 2000», Document de synthèse, Bureau central de statistique, **Oslo.**

Capros, P., P. Karadeloglou et G. Mentras (1990), « The MIDAS energy model and the MIDAS-HERMES linked system », document présenté lors de la réunion de travail intitulée Economic/Energy/Environmental Modeling for Climate Change Policy Analysis, Washington (octobre).

Chandler, W.U. (dir. pub.) (1990), ***Carbon Emission Control Strategies. Case Studies in International Cooperation,*** Washington.

Cline, W.R. (1990), « Greenhouse warming abatement : lower benefits and higher cost?», polycopié, (février).

Cline, W.R. (1989), « Political economy of the greenhouse effect», polycopié, (août).

Cline, W.R. (1989*a*), ((Global warming : policy decisions under uncertainty », polycopié, (novembre).

Congress of the United States, Congressional Budget Office (CBO) (1990), « Carbon charges as a response to global warming : the effect of taxing fossil fuels», Washington (août).

Daly, T.A., N. Goto, R.F. Kosobud et W.D. Nordhaus (1984), « CO_2 forecasting and control: a mathematical programming approach», dans J. Weyant and D. Sheffield (dir. pub.), The *Energy* industries in Transition, 1985-2000, International Organisation of Energy Economists, Westfield Press.

Darmstadter, J. et J. Edmonds (1989), «Human development and carbon dioxide emissions: the current picture and long-term prospects,)) dans N.J. Rosenberg et al. (dir. pub.), Greenhouse Warming: Abatement and Adaptation, (Washington: Resources for the Future), pp. 31-51.

Dixon, P.B., D.T. Johnson, R.E. Marks, P. McLennan, R. Schodde et P.L. Swan (1989), «The feasibility and implication for Australia of the adoption of the Toronto proposal for carbon dioxide emissions», Rapport au CRA, Sydney (septembre).

Edmonds, J.A. et D.W. Barns (1990), «Estimating the marginal cost of reducing global fossil fuel CO_2 emissions», polycopié, (août).

Edmonds, J.A. et J.M. Reilly (1983). ((Global energy and CO_2 to the year 2000», The Energy Journal, vol. 4, pp. 21-47.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1989), «Policy options for stabilizing global climate», Projet de rapport au Congrès (mars).

Glomsred, S., T. Johnsen et H. Vennemo (1990), «Stabilisation of emissions of CO_2: a computable general equilibrium assessment», Document de synthèse n° 48, Bureau central de statintique, **Oslo** (avril).

Het *Financiele* Dagblad, 21/5/1990.

Houghton, R.A. et G.M. Woodwell (1989). «Global climate change)), *Scientific American,* n° 4.

Hubbard, H.M. (1989), «Prospects for increasing the potential of renewable technologies to alleviate global concerns», dans AIE, Energy Technologies for Reducing *Emissions* of Greenhouse Gases, Compte rendu d'un séminaire d'experts, vol. 2, Paris.

Ingham, A. et A. Ulph (1990), «Carbon taxes and the U.K. manufacturing sector», University of Southampton, polycopié.

IPCC (Groupe d'experts intergouvernementaux pour l'étude du changement climatique) (1990), «Policy makers summary of the scientific assessment of climate change», OMM et PNUE, New York (juin).

Jorgenson, D.W. et P.J. Wilcoxen (1990), «The cost of controlling U.S. carbon dioxide emissions», Harvard University, polycopié, (septembre).

Kram, T. et P.A. Okken (1989), «Two 'low CO_2' energy scenarios for the Netherlands», dans AIE, *Energy* Technologies for Reducing Emissions of Greenhouse Gases, Compte-rendu d'un séminaire d'experts, vol. 2, Paris.

Manne, A.S. (1990), «Global 2100: an almost consistent model of CO_2 emission limits», document présent8 lors de la conférence intitulée Applied Equilibrium Modeling Conference, Bern, polycopié, (mars).

Manne, A.S. et R.G. Richels (1990), ((Global CO_2 emission reductions – the impacts of rising energy costs», version révisée d'un document soumis à l'Association internationale des économistes de l'énergie, New Delhi; l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués, Laxenburg; et InterAction Council, Amsterdam (juin), à paraître dans The *Energy* Journal.

Manne, A.S. et R.G. Richels (1990*a*), « CO_2 emission reductions: an economic cost analysis for the USA)), The *Energy* Journal, vol. 11. (avril).

Mintzer, I.M. (1987), ***A Matter*** of ***Degrees: the Potential for Controlling the Greenhouse Effecr,*** World Resources Institute Research Report 5, Washington.

NEPP (Plan national pour l'environnement des Pays-Bas) (1989). ***To Choose*** or ***to Lose,*** Second Chamber of the States General, s'Gravenhage.

Nicolaisen, J., A. Dean and P. Hoeller (1991), ((Économie et environnement: problèmes et orientations possibles», ***Revue économique de l'OCDE,*** n° 16 (printemps).

Nordhaus, W.D. (1990), «A survey of estimates of the cost of reduction of greenhouse gas emissions», polycopié.

Nordhaus, W.D. (1990*a*), «To slow or not to slow: the economics of the greenhouse effect», version révisée d'un document présenté en 1989 lors d'une réunion de travail intitulée International Energy Workshop et d'un symposium du MIT sur le thème ((environnement et énergie».

Nordhaus, W.D. (1990*b*), «Greenhouse economics. Count before you leap», ***The Economist,*** 7-13 juillet.

Nordhaus, W.D. (1979), ***The Efficient Use of Energy Resources,*** Cowles Foundation Monograph 26, Yale University Press.

Nordhaus, W.D. (1977), «Economic growth and climate: the carbon dioxide problem», ***American Economic Review,*** Documents de travail et comptes rendus, (février), pp. 341-346.

Nordhaus, W.D. et G.W. Yohe (1983). ((Future carbon dioxide emissions from fossil fuels», dans National Academy of Science, ***Changing Clirnate,*** Washington.

Pearce, D. (1990), «Economics and the global environmental challenge», The Henry Sidgwick Memorial Lecture at Newnham College, Cambridge, polycopié, (février).

Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) (1989), «Rapport du groupe économie: Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone», New York (juillet).

Rapport à l'intention de la Commission des Communautés européennes (1990), «Cost-effectiveness analysis of CO_2 reduction options)), élaboré par le Center of Energy Policy Research (MIT) et le laboratoire d'études sur l'environnement mondial (Université de Tokyo). Document exposé lors de la réunion de travail intitulée Economic/Energy/Environmental Modeling for Climate Policy Analysis, Washington (octobre).

Rapport du groupe Energy Systems Program de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (1981), ***Energy in a Finite World. Paths to a Sustainable Future,*** vol. I et vol. II, Cambridge, Massachusetts.

Reilly, J.M., J.A. Edmonds, R.H. Gardner et A.L. Brenker (1987), «Uncertainty analysis of the AIE/ORAU CO_2 emissions model», ***The Energy Journal,*** vol. 8, n° 3, pp. 1-29.

Schneider, S.H. (1989), ***Global Warming. Are We Entering the Greenhouse Century?,*** San Francisco.

Sedjo, R.A. (1990), «Forests to offset the greenhouse effect», ***Journal*** of ***Forestry,*** pp. 12-15, (juillet).

Smith, D.A. et K. Vodden (1989), «Global environmental policy: the case of ozone depletion», ***Canadian Public Policy – Analyse des politiques,*** XV:4, pp. 413-423.

Solow, A. (1990), «Is there a global warming problem?», Woods Hole Oceanographic institution, Woods Hole, polycopié, (septembre).

Torrens, I.M. (1989), « Global greenhouse warming : role of power generation sector and mitigation strategies», dans AIE, ***Energy Technologies*** for ***Reducing Emissions of Greenhouse Gases,*** Compte rendu d'un séminaire d'experts, vol. 2, Paris.

Whalley, J. et **R.** Wigle (1989). « Cutting CO_2 emissions: the effects of alternative policy approaches», document présenté lors de la réunion annuelle de l'Association canadienne d'économie.

Whalley, J. et R. Wigle (1990), « The International incidence of carbon taxes)), document élaboré pour une conférence sur le thème « Economic policy responses to global warming », Turin (septembre).