

**(In)efficience, (In)efficacité et (In)égalité
de la politique économique et des négociations
sur les changements climatiques**

Bertrand Hamaide

Facultés Universitaires Saint Louis, Bruxelles, Belgique
Faculté Universitaire des sciences agronomiques, Gembloux, Belgique
hamaide@fusl.ac.be

1. Introduction

L'interférence de l'homme avec l'effet de serre naturel, notamment par l'émission de combustibles fossiles et la déforestation, a contribué à accroître la concentration de gaz à effet de serre entraînant un réchauffement estimé de la planète allant de 1.5 à 4.5 degrés Celsius à l'équilibre (avec une valeur de 2.5 degrés pour cette étude) lors du doublement futur de la concentration de CO₂ par rapport à la période préindustrielle. C'est lors de la signature de la convention cadre sur les changements climatiques à Rio en 1992 que le public et les médias se sont émus de ce problème environnemental qui a par ailleurs pris une importance grandissante au fil du temps suite aux réunions successives culminant avec le Protocole de Kyoto en 1997, le retrait des États Unis de ce Protocole en 2001 et la préparation du Sommet de Johannesburg en 2002.

Le problème des changements climatiques a d'abord été étudié par des physiciens et des chimistes puis en collaboration avec des mathématiciens pour la construction de modèles de circulation ; ensuite vinrent, entre autres, les économistes pour l'analyse et l'évaluation de différentes politiques, les juristes pour l'établissement d'un cadre juridique national et supra-national, les sociologues pour l'étude de l'impact sociétal et comme vision alternative et/ou complémentaire à l'économie... En somme

l'interdisciplinarité de ce problème est telle que chaque étude doit être appréciée comme un apport à un édifice important plutôt qu'une recommandation précise éludant d'autres objectifs. Cette recherche aborde dans un premier temps l'aspect économique des changements climatiques comme si le phénomène était isolé des autres branches mais viendra atténuer ces propos en intégrant des objectifs d'efficacité et d'équité et en tenant compte de l'interaction avec d'autres disciplines.

Le cadre théorique standard pour les économistes de l'environnement est l'économie du bien-être, via la théorie des externalités. Le rejet dans l'atmosphère de gaz à effet de serre entraînant une modification du climat est un bien public négatif (ou « mal » public) causant une externalité et générant une défaillance des marchés qui ne peuvent seuls générer le montant optimal de pollution. Les économistes essaient donc d'internaliser cette externalité (ou de donner un prix au bien public) par des politiques économiques (taxes, par exemple) ou non économiques (normes, par exemple). La difficulté supplémentaire de l'effet de serre est que le problème est international et même global et qu'aucun pays n'a le droit d'imposer une politique ou un objectif à un autre pays. L'internalisation se déroule donc par négociations (qui ont lieu depuis 10 ans et ont débouché sur le Protocole de Kyoto) et accords de coopération entre différentes parties en vue de réduire leurs émissions propres. Le principe théorique qui permet d'étudier les stratégies des pays, la coopération ou le refus de coopération est la théorie des jeux (et plus précisément la théorie des jeux coopératifs avec utilité transférable lorsqu'on accepte l'idée qu'un joueur puisse compenser un autre joueur afin d'induire sa participation s'il y a une raison économique valable sous-jacente). Ce cadre d'analyse est dans un premier temps utilisé pour étudier la faisabilité d'une coopération théorique totale ou partielle (dans un monde limité à cinq régions) et son impact économique, environnemental, de

même que son équité ; par rapport à un comportement de rationalité individuelle sans coopération trans-groupe. C'est l'objet de la seconde section. La troisième section prend le problème à l'envers : on part de politiques économiques (et non de la théorie économique) en on étudie leur pertinence. La dernière section conclut le travail en insistant sur la relative efficience, efficacité et équité des résultats obtenus et en refaisant le lien indispensable, suite à ces résultats, avec les autres disciplines.

2. Le modèle : coopérer un peu, beaucoup ou pas du tout et pour quel optimum, quelle efficacité et quelle équité ?

2.1. LES HYPOTHESES

Les hypothèses principales du modèle concernent a) la division du monde en différentes entités, b) la durée de l'analyse, c) la définition des variables d'émission (E) et de réduction (Θ) de gaz à effet de serre, d) l'impact sur la température moyenne d'un doublement de concentration de CO_2 par rapport à la période préindustrielle, e) la définition et les particularités des fonctions de coûts et de bénéfices de réduction d'émission et f) la valeur du taux d'actualisation.

Le monde est divisé en cinq groupes (appelés joueurs en théorie des jeux) comprenant les États-Unis (USA), les autres pays de l'OCDE (AOCDE), l'ancienne Union Soviétique (AUS), la Chine (Ch) et le reste du monde (RDM) (OECD, 1993).

L'analyse s'étend de 1990 à 2100 afin de mettre en exergue le fait que le changement climatique est par essence un problème de long terme.

Pour chaque groupe j , la réduction d'émission dans le temps - $\Theta_j(t)$ - mesurée en milliard de tonnes de carbone est égale à la différence entre les émissions sans contrainte - business-as-usual : $E_j^B(t)$ - estimées jusqu'en 2100 (Manne et Richels,

1992, 2000 et Manne, 1993) et les émissions induites par une politique restrictive,

$E_j(t)$:

$$\Theta_j(t) = E_j^B(t) - E_j(t) \quad (1)$$

Ces données sont sommées sur la période considérée afin d'obtenir les agrégats E^i et Θ représentant les émissions et la dépollution mondiale relative à une certaine politique environnementale.

On prend ensuite l'hypothèse qu'un doublement de la concentration de CO_2 par rapport à la période préindustrielle induira une hausse de la température moyenne globale, à l'équilibre de 2.5 degrés centigrades. Ce paramètre ($\nu=2.5$) est utilisé dans le calcul des dommages.

Les coûts sont calculés comme la perte de PIB (produit intérieur brut) d'un groupe suite aux modifications des décisions énergétiques imposées par la réduction d'émissions de CO_2 (Nordhaus, 1994 ; OECD, 1993). On estime donc les fonctions régionales de coût en rapport avec l'intensité des politiques régionales de réduction d'émission ; en d'autres termes, $C_j = f(\Theta_j)$. Les bénéfices sont calculés comme la valeur monétaire des dommages évités en entreprenant une politique restreignant les émissions. Pour ce faire, on estime les dommages régionaux au doublement de la concentration de CO_2 , puis leur évolution temporelle afin de pouvoir, tout d'abord, estimer les bénéfices régionaux à diverses périodes et ensuite les bénéfices régionaux de politiques environnementales globales (Hamaide et Boland, 2000) - puisque chacun bénéficie de la dépollution globale de l'atmosphère. En d'autres termes, on calcule $B_j = f(\Theta)$. On suppose encore que les coûts et les bénéfices sont additifs : $B = \sum_j B_j$ et $C = \sum_j C_j$.

Les coûts et les bénéfices, s'étalant de 1990 à 2100, sont actualisés au taux uniforme de 2% (Lind, 1990).

2.2. L'IMPACT DES HYPOTHESES

Comme dans tout exercice de modélisation, il est important de rappeler que les résultats dépendent en partie des hypothèses posées et des estimations d'autres auteurs utilisées comme input pour le modèle. Il est donc utile de revoir ces hypothèses, de les justifier et d'expliquer l'impact qu'elles pourraient avoir sur les résultats obtenus.

La division du monde en cinq entités est certes arbitraire ou peut être considérée comme trop limitée. Elle se justifie néanmoins par la contrainte de la disponibilité des données malgré que certains auteurs aient développé des modèles récents avec davantage de joueurs (Nordhaus et Yang, 1996). Certains groupes sont certainement trop hétérogènes (par exemple, l'Arabie Saoudite, l'Inde et le Togo font tous trois partie du reste du monde alors que leur contribution respective à l'effet de serre est totalement différente), ce qui peut empêcher de tirer des conclusions précises pour un pays déterminé. Néanmoins, chaque groupe est un pollueur important et l'interaction entre ces entités donne une bonne tendance générale des intérêts divergents ou de la possibilité d'une coopération globale ou partielle.

Le modèle développé ici est une analyse statique d'un problème dynamique. De fait, si les coûts et bénéfices sont calculés dans le temps, ils sont ensuite actualisés et comparés en fonction de l'importance de la réduction globale (au sens temporel) des émissions. Une étude complètement dynamique pourrait peut être donner des résultats différents. Néanmoins, puisque les politiques considérées au Protocole de Kyoto mettent en avant un niveau d'émission à atteindre à un certain moment du temps plutôt qu'une trajectoire d'émission (obligeant alors une analyse dynamique), une analyse statique semble acceptable (Chander et al., 1999)

L'hypothèse d'une augmentation de la température de 2.5 degrés au doublement de concentration de CO₂ est dans la norme (Cline, 1992) et une modification d'un demi degré en plus ou en moins ne ferait qu'avancer ou retarder légèrement les bénéfices sans avoir d'impact significatif sur les coûts et bénéfices régionaux agrégés dans le temps.

Plusieurs données concernant les coûts et les dommages ont été calculées par d'autres auteurs et les résultats en dépendent certainement. En d'autres termes, les résultats du modèle ne peuvent être crédibles que si les estimations préalables des coûts (et dans une moindre mesure des bénéfices) sont également crédibles, ce qui oblige à les interpréter avec précaution. Ceci est malheureusement vrai pour toute estimation algébriqueⁱⁱ.

Le taux d'actualisation choisi ici est de 2 pour cent et il est uniforme. L'idée même du taux d'actualisation est souvent critiquée. Premièrement, un taux d'actualisation, même très faible, engendre obligatoirement un problème d'équité intergénérationnelle pour des projets de long terme comme les changements climatiques. Deuxièmement, un taux différencié pourrait aider les pays moins développés. Ces éléments doivent certainement être pris en compte mais hors des techniques rigides d'actualisation car du point de vue économique, lorsqu'on accepte de monétiser des coûts et des bénéfices, on accepte donc la comparaison et partant, on se doit de prendre en compte la théorie dans son ensemble et l'actualisation en particulier (Barron, Perlack et Boland, 1998) puisque la préférence temporelle et les rendement des capitaux sont des notions incontestables. Néanmoins, l'équité intergénérationnelle ne peut être mise de côté et c'est là (entre autres) qu'intervient l'interdisciplinarité d'une étude sur les changements climatiques : une étude

économique doit impérativement être complétée par des apports externes tels, dans ce cas précis, la sociologie, le droit et l'anthropologie.

L'agrégation des coûts et bénéfices est une hypothèse fréquente en économie, mais peut être questionnable sur le plan de l'équité inter-pays.

En conclusion, une analyse coût-bénéfice se base sur un certain nombre d'hypothèses, qui peuvent être considérés par certains comme des jugements de valeur, pour déterminer des recommandations politiques. Ces hypothèses ont été justifiées ci-dessus et sont souvent corroborées par des études indépendantes mais elles influencent certainement les résultats finaux, qui demandent donc une certaine prudence dans leur interprétation.

2.3. LES OBJECTIFS DU MODELE DE COÛT-BENEFICE

Economiquement, la problématique d'une analyse coût-bénéfice de l'effet de serre peut être exprimée comme suit. Le fait qu'il n'existe pas d'organisation supra-nationale permettant de décider à la place des cinq régions de la politique commune à appliquer, chaque entité peut choisir soit de se comporter de manière individualiste (mais rationnelle) sans tenir compte de l'impact de sa pollution envers les autres agents, soit de coopérer avec toutes les autres entités afin d'arriver à une politique socialement désirée (et donc d'internaliser l'externalité) soit encore de coopérer seulement avec les régions qui le souhaitent. Méthodologiquement parlant, ces cas de figure impliquent différentes stratégies et la coopération ou non entre agents s'étudie par la théorie des jeux.

La première stratégie suppose que la région j décide d'ignorer l'impact de sa politique d'émission envers les autres régions. Par définition, elle maximise donc son propre bien-être (défini ici comme le bénéfice net d'une politique restrictive, puisqu'il

s'agit d'une analyse coût-bénéfice) en prenant les décisions des autres entités comme données

$$\text{Max}_{\Theta_j} W_j = [\alpha_j \Theta + \sigma_j \Theta^2 - (\lambda_j \Theta_j + \mu_j \Theta_j^2)] \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

ce qui implique un niveau optimal de réduction Θ_j tel que $C_j'(\Theta_j) = B_j'(\Theta)$, sachant que $C_j(\Theta_j) = \lambda_j \Theta_j + \mu_j \Theta_j^2$ et $B_j(\Theta) = \alpha_j \Theta + \sigma_j \Theta^2$ (dérivation et estimation des paramètres en Annexe).

L'efficience économique globale au sens de Pareto exige une coopération complète. L'objectif est donc de maximiser le bien-être social (la société étant prise ici comme la somme des individus), ce qui est équivalent à fusionner les cinq entités pour qu'elles parlent d'une seule voix dans la décision de politique environnementale :

$$\text{Max}_{\Theta_1, \dots, \Theta_N} W = \left[\alpha \Theta + \sigma \Theta^2 - \sum_{i=1}^N (\lambda_i \Theta_i + \mu_i \Theta_i^2) \right] \quad (3)$$

avec $\alpha = \sum_i \alpha_i$ et $\sigma = \sum_i \sigma_i$. Le niveau optimal de réduction Θ_j égalise donc le coût marginal régional de réduction avec le bénéfice social marginal de dépollution :

$$C_j'(\Theta_j) = B'(\Theta).$$

Une coopération partielle reprend les équations 2 et 3 déterminées maintenant en sous groupe où chaque entité non coopérative m maximise son propre bénéfice net (équation 4) tandis que les pays coopératifs y maximisent le bien-être de leur sous groupe (équation 5), ce qui entraîne une dépollution optimale respective obéissant aux égalités $C_m'(\Theta_m) = B_m'(\Theta)$ ou $C_y'(\Theta_y) = \sum_y B_y'(\Theta)$.

$$\text{Max}_{\Theta_m} W_m = [\alpha_m \Theta + \sigma_m \Theta^2 - (\lambda_m \Theta_m + \mu_m \Theta_m^2)] \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

$$\text{Max}_{\Theta_1, \dots, \Theta_Y} W^* = \sum_{y=1}^Y [\alpha_y \Theta + \sigma_y \Theta^2 - (\lambda_y \Theta_y + \mu_y \Theta_y^2)] \quad \forall y = 1, 2, \dots, Y \quad (5)$$

et $M + Y = N$.

2.4. LES RESULTATS

Les montants optimaux régionaux de dépollution en valeur absolue (Θ_j) sur 110 ans et en pourcentage ($R_j = \Theta_j/E_j$) ainsi que les bénéfices nets y afférant ($W_j = B_j - C_j$), en cas de non-coopération (le chacun pour soi ou équilibre non coopératif de Nash) et de coopération globale (internalisation et optimum de Pareto) sont illustrés dans le Tableau I.

La restriction optimale mondiale lorsque chaque région poursuit son propre intérêt est particulièrement faible puisqu'elle ne représente que 5.8% des émissions globales. Elle est par contre de 16.6% à l'optimum de Pareto et induit un bien-être social (bénéfice net global) nettement supérieur (6305 par rapport à 4355).

	Θ_j non coopératif	W_j non coop	Θ_j coopératif	W_j coop
USA	0% (0)	354	14.7% (44.23)	282
AOCDE	1.5% (4.79)	624	14.5% (46.25)	1105
AUS	10.9% (17.76)	1139	13.3% (21.70)	1468
Chine	0% (0)	667	17.6% (64.36)	637
RDM	12.8% (82.04)	1571	18.9% (120.55)	2813
Total	5.8% (104.59)	4355	16.6% (297.09)	6305

Tableau I: Réductions coopératives et non-coopératives optimales (Θ_j) en pourcentage des émissions régionales et en milliards de tonnes de carbone équivalent sur la période 1990-2100 (entre parenthèses) et bénéfices nets (W_j) en milliards de dollars à prix constant de 1990.

En examinant ces résultants sous le triple angle de l'efficienne, de l'efficacité et de l'équité, on peut tirer les conclusions suivantes.

Premièrement, au niveau de l'efficacité, une politique environnementale économiquement rationnelle mais propre à chaque entité est peu efficace puisqu'elle

ne permet de réduire que très faiblement le montant global d'émissions. Une coopération globale est par contre trois fois plus efficace (16.6% par rapport à 5.8%).

L'objectif coopératif donne une solution optimale au sens de Pareto puisqu'à ce point, il n'est pas possible d'augmenter le bénéfice net d'une entité sans diminuer celui d'une autre. Cet optimum social se caractérise par un bénéfice net global plus élevé que l'optimum individuel mais l'efficacité globale implique néanmoins que chaque joueur soit dans une situation au moins aussi bonne qu'en ne coopérant pas, ce qui n'est pas le cas de la Chine ni des États Unis. Dès lors, le principe de compensation (les pays qui gagnent doivent compenser ceux qui perdent par un montant au moins aussi grand que la perte de bien-être des perdants) doit obligatoirement s'appliquer, ce qui est théoriquement possible puisque les montants gagnés sont largement supérieurs aux montants perdus, pour que la solution coopérative soit efficiente et applicable en théorie.

Une analyse de ces résultats quant à leur équité milite néanmoins pour leur impossibilité pratique de mise en œuvre, aussi bien pour la formulation non coopérative que pour l'objectif coopératif. De fait, dans le premier cas, les pays ne faisant pas partie de l'OCDE supporteraient environ 95% de l'effort total alors que les États Unis feraient du free-riding (pas de réduction d'émission tout en bénéficiant de la politique restrictive des autres joueurs). S'il est efficient de réduire davantage les émissions là où le coût est moindre (ce qui minimise le coût global), c'est-à-dire dans les pays moins développés, il est néanmoins illusoire de penser que cela pourrait être négocié lors d'une Conférence des Parties. Étant difficilement défendable sur le plan de l'équité et contraire aux discussions entre les Parties depuis 1992, la rationalité économique semble donc inapplicable en pratique dans ce cas de figure. Il en va exactement de même dans le second cas (objectif coopératif) où les restrictions

incombent encore très majoritairement aux pays pauvres (près de 70%). Qui plus est, le problème d'équité est encore exacerbé par le fait que les États Unis devraient théoriquement recevoir des paiements compensatoires pour que l'optimum de Pareto soit atteint, alors que cette région est toujours l'entité la plus polluante en terme de CO₂ ! On ne peut donc que conclure à l'impossibilité réaliste d'atteindre l'optimum coopératif étant donné sa distribution inégale des efforts à entreprendre malgré que le résultat soit mathématiquement accessible. Seule la coopération partielle peut donc être envisagée.

Économiquement parlant, les pays acceptant de coopérer maximisent le bénéfice net de leur coalition comme s'il s'agissait d'une seule entité alors que les pays non coopérants égalisent les coûts et bénéfices marginaux de leur propre action. Deux coalitions sont comparées ici : celle reprenant grossièrement les pays de l'annexe I du Protocole de Kyoto (USA+AOCDE+AUS) et celle sans les États Unis qui ont décidé de « sortir » unilatéralement du Protocole en ne le ratifiant pas (AOCDE+AUS). La résolution des équations 4 et 5 (présentée en annexe) permet de trouver les valeurs optimales de réduction d'émission et de bénéfice net pour les deux cas de figure et les valeurs des différentes variables sont exposées dans le tableau II.

	Coalition 1		Coalition 2	
	W_j	R_j en %	W_j	R_j en %
USA	-68	14.8	511	0
AOCDE	469	14.5	196	15.5
AUS	1257	13.8	1168	13.8
Chine	1240	0	962	0
RDM	2475	12.8	2035	12.8
W, R	5374	10.9	4872	8.4

Tableau II: Bénéfice net régional (W_j) – en Md. US\$ - et réduction d'émission (R_j) – en pourcentage par coalition

La première coalition, composée des États Unis, des autres pays de l'OCDE et de l'ancienne Union Soviétique, réduit globalement ses émissions de 10.9%, ce qui est quasiment à mi-chemin entre les solutions coopératives et non coopératives pour un bénéfice net d'une ampleur moyenne entre les objectifs précédents. Lorsque les États Unis ont décidé unilatéralement de ne pas ratifier le Protocole de Kyoto, dans l'optique développée ici, ils comparent donc leurs propres coûts et bénéfices et arrivent à la conclusion que leur réduction optimale est nulle (cette assertion dépend bien évidemment des données existantes de coûts utilisées dans cette recherche et des calculs de bénéfices). La première proposition semble assez efficace puisqu'elle a le mérite de quasiment doubler l'effort non coopératif et la seconde l'est relativement moins vu que les États Unis sont alors dans une optique de « free riding ». Aucune des deux options n'est néanmoins efficiente (first best) dans le sens de la théorie économique du bien-être social même si chacun des agents agit de manière optimale (économiquement rationnelle) en fonction de sa stratégie prédéterminée.

Sur le plan de l'équité, comme auparavant, aucune des deux propositions n'est viable en pratique même si elles pourraient être justifiées d'un point de vue strictement économique. De fait, les deux scénarios imposent techniquement une compensation des pays moins industrialisés à la Chine ainsi qu'aux pays de l'OCDE, pour être globalement profitable par rapport à la solution non coopérative, alors que depuis le Sommet de Rio en 1992, un effort éventuel de ces pays a toujours été mis en parallèle avec une aide des pays riches aux pays pauvres. Pire encore, comment peut-on envisager de demander à la Chine et au RDM d'être économiquement rationnel (réduire leurs émissions en comparant leurs propres coûts et bénéfices) alors que les États Unis seraient dispensés de tout effort (étant donné leur courbe de coût élevée) ?

Une telle justification économique paraît si inéquitable qu'elle n'a que peu de sens pratique même si les transferts monétaires sont mathématiquement réalisables.

En somme, une étude coût-bénéfice de non coopération et de coopération complète ou partielle, avec les hypothèses mentionnées en début de section, ne peut engendrer de résultat exploitable politiquement et pratiquement étant donné qu'elle implique dans tous les cas la spoliation des pays moins développés. Cela signifie-t-il que le Protocole de Kyoto, malgré les nombreuses critiques des économistes, est finalement une bonne alternative ou aurait-il été préférable d'aller dans une autre direction alliant les avantages d'une participation de nombreux pays (pour être efficace) et d'une prise en charge majoritaire des pays riches (par équité et suite à leur exploitation historique des ressources communes et biens publics) ? Ce sera l'objet de la section suivante.

3. La politique et les négociations : abandonner l'efficience mais garder au mieux l'efficacité et l'équité

L'objet de cette section est davantage pragmatique plutôt qu'économique. Au lieu de trouver un optimum économique et de voir ensuite s'il est acceptable sous d'autres critères, on veut maintenant voir ce qui est accepté ou acceptable en fonction de critères non économiques et ensuite déterminer la pertinence économique relative.

Les politiques examinées dans cette section sont d'une part, des réductions uniformes, et d'autre part, des restrictions basées sur des idées discutées depuis le Sommet de Rio jusqu'au Protocole de Kyoto et incluant ou pas des contraintes pour les pays hors OCDE.

3.1. QUID D'UNE REDUCTION UNIFORME ?

Étant donné que les restrictions quantitatives (normes) sont les politiques environnementales les plus courantes, il semble intéressant de déterminer quelle serait l'impact environnemental et économique d'une réduction annuelle uniforme. On peut estimer le montant « idéal » de réduction uniforme comme étant la valeur de Θ telle que $B'(\Theta)=C'(\Theta)$. Ayant déjà estimé précédemment la courbe $B(\Theta) = \alpha\Theta + \sigma\Theta^2$ dans l'étude coopérative, il ne reste qu'à définir $C(\Theta) = \sum_j C_j(\Theta_j) = l\Theta + u\Theta^2$ où l et u sont respectivement égaux à -14.58 et 0.0733 . Les conditions de premier ordre

$$\Theta = \frac{l - \alpha}{2(\sigma - u)} \quad (6)$$

permettent de trouver la réduction uniforme optimale à appliquer, c'est-à-dire, 16.5% de la somme des émissions mondiales ($\Theta=296$), ce qui est très similaire à la restriction obtenue en coopération globale (16.6%). Par ailleurs, la distribution des coûts et bénéfices est bien plus favorable pour les pays moins développés (spécialement pour le RDM) qu'une analyse coopérative ou non coopérative (cfr. Tableau III).

	$R_j = R = 0.165$		Non Coop	W_j coop
	W_j	Θ_j	W_j	W_j
USA	113	50	354	282
AOCDE	906	53	624	1105
AUS	1244	27	1139	1468
Chine	735	61	667	637
RDM	3139	105	1571	2813
W, Θ	6136	296	4355	6305

Tableau III: Bénéfice net régional (W_j) – Md US\$ - et réduction (Θ_j) – en Md de tonnes de carbone équivalent – d'une politique de réduction d'émissions uniforme (16.5%)

Il est paradoxal de constater qu'une proposition aussi simple a des atouts non négligeables. Premièrement, elle est efficace car d'une part, on arrive au même

impact environnemental qu'à l'optimum de Pareto et d'autre part, l'évolution des émissions et l'augmentation de la température d'équilibre est quasiment aussi faible que ce qui est attendu si le Protocole de Kyoto original (voir infra, section 3.2) était appliqué, comme illustré en figures 1 et 2ⁱⁱⁱ. Elle est ensuite bien plus justifiable sur le plan de l'équité que toutes les solutions « économiques » puisque l'effort est réparti de manière uniforme^{iv}. Par ailleurs, la redistribution des bénéfices est telle que les trois groupes non membres de l'OCDE préfèrent cette situation à leur propre optimum individuel (solution non coopérative). Qui plus est, le bénéfice net est quasiment aussi élevé qu'à l'optimum de Pareto (défini comme optimum social en économie) et du point de vue économique, la politique est réalisable tant que les USA sont compensés de leur perte, ce qui peut être réglé par les seuls autres pays de l'OCDE qui ont un gain additionnel plus important que la perte des USA par rapport à la non coopération. Autrement dit, chaque joueur peut être dans une situation plus appréciable en cas de restriction uniforme avec compensation et la distribution des bénéfices est bien plus équitable puisque 85% des bénéfices nets globaux reviennent au pays moins industrialisés.

3.2. DE RIO A KYOTO ET AU DELA

Si la réduction uniforme semble techniquement réaliste, économiquement intéressante et appréciable du point de vue environnemental, elle ne cadre pas avec la responsabilisation des pays développés mise en avant depuis sommet de la terre. De manière pragmatique, il serait donc intéressant de déterminer les conséquences d'une stabilisation des émissions des pays de l'OCDE (avec ou sans contrainte pour les autres pays) comme cela fut proposé lors de la convention cadre sur le changement climatique et les restrictions d'émissions suggérées dans le Protocole de Kyoto.

Les quatre scénarios hypothétiques considérés sont donc les suivants^v : a) stabilisation des émissions des pays de l'OCDE aux niveaux de 1990 sans restriction pour les autres pays, b) stabilisation des émissions de l'OCDE avec une réduction uniforme des émissions des pays moins développés de 16.5% (sur base du sentier des émissions libres – « Business-as-Usual ») à partir de 2010, c) le Protocole de Kyoto stipulant une diminution des émissions de 5.2% pour les pays de l'Annexe I en 2008-2012 sans autre restriction formelle pour les autres pays et d) le scénario précédent sans la participation des USA. Les valeurs de Θ_j , calculées par l'équation 1, et les bénéfices nets, obtenus en résolvant l'équation 2^{vi}, sont illustrés dans le Tableau IV.

	scenar 1			scenar 2			scenar 3			scenar 4		
	W_j	Θ_j	R_j	W_j	Θ_j	R_j	W_j	Θ_j	R_j	W_j	Θ_j	R_j
USA	-4654	139	46.5	-4033	139	46.5	-5231	149	49.8	753	0	0
AOCDE	-5983	167	52.2	-4838	167	52.2	-6510	177	55.3	-7425	177	55.3
AUS	612	0	0	1740	25	15.3	-823	46	28.2	-1121	46	28.2
Chine	1940	0	0	2015	59	16.2	2353	0	0	1417	0	0
RDM	3057	0	0	5151	103	16.4	3716	0	0	2229	0	0
W, Θ, R	-5028	306	17.1	35	493	27.6	-6495	372	20.8	-4147	223	12.5

Tableau IV: Bénéfice net régional (W_j) – en Md. US\$ - et réduction d'émission en Md. De tonnes de C (Θ_j) et en pourcentage (R_j)

Une politique de stabilisation des émissions des pays de l'OCDE impose un coût net très important pour ces pays alors que les autres retirent logiquement le bénéfice de la dépollution des pays riches. Si la Chine et le RDM ne peuvent qu'adhérer à une telle politique hypothétique, il est intéressant de constater que l'ancienne Union Soviétique aurait néanmoins intérêt à ne pas faire de « free riding » mais à diminuer ses émissions au point de Nash (non coopération). Ce fait n'est néanmoins pas pris en compte ici puisque le point de départ est une politique hypothétique et non un

comportement rationnel sur le plan de la théorie économique. Globalement, la perte nette d'une telle politique est importante ($W=-5028$) – inefficience économique – mais l'impact environnemental est plus élevé encore qu'avec une coopération généralisée (17.1%) et l'effort est concentré sur les pays riches. En d'autres termes, le scénario est efficace et équitable mais assez difficile à justifier du point de vue économique.

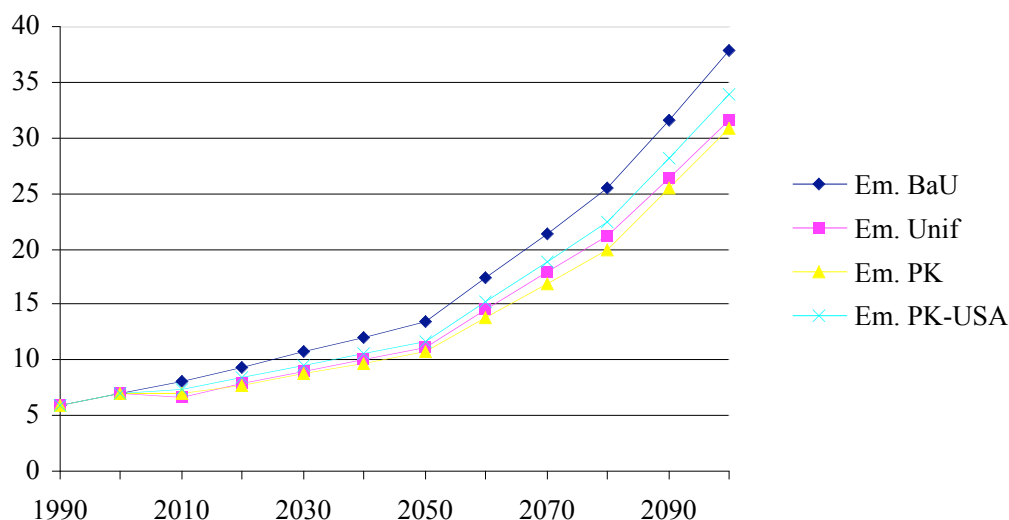


Figure 1 : Évolution temporelle des émissions pour une politique sans restriction (BaU), une réduction uniforme de 16.5% par période à partir de 2010 (unif), le Protocole de Kyoto avec (PK) et sans (PK-USA) les USA.

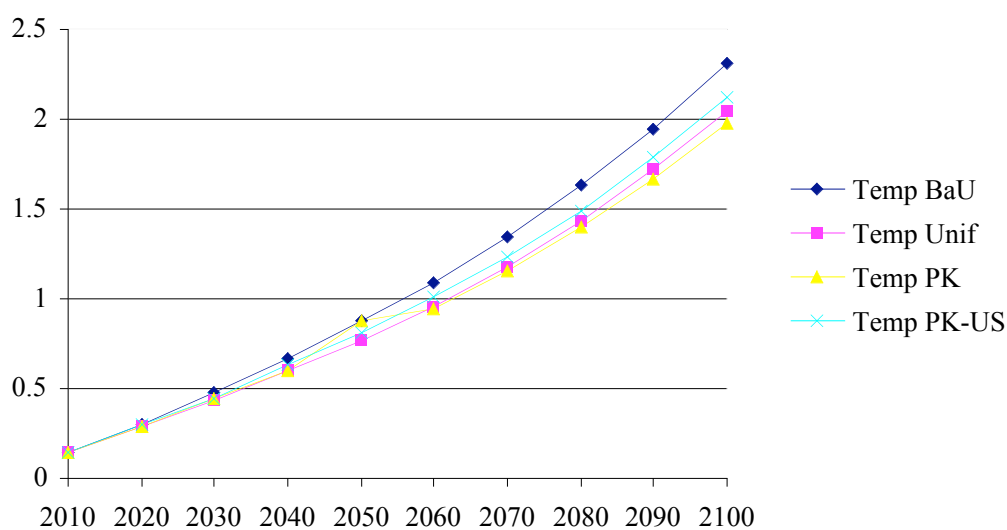


Figure 2 : Évolution de la température d'équilibre pour les mêmes politiques que celles de la Figure 1.

Il a été montré plus haut qu'une réduction uniforme de 16.5% des émissions annuelles de chaque région (par rapport à E_j^B) était une alternative simple et intéressante. Le but est donc de voir si l'imposition de cette contrainte aux pays non-membres de l'OCDE alors que les pays riches sont toujours supposés stabiliser leurs émissions permet d'obtenir un meilleur résultat économique tout en maintenant l'efficacité et l'équité. Premièrement, l'efficacité est logiquement supérieure (27.6% de réduction d'émission) puisque tout le monde contribue à dépolluer. Du point de vue économique, la situation s'est globalement améliorée car on obtient un léger bénéfice net – qui n'est cependant pas comparable avec les résultats obtenus en coopération et non coopération. Le scénario semble également équitable pour deux raisons majeures : l'effort relatif est largement plus grand pour les pays riches (réduction de près de la moitié de leurs émissions libres) que pour les pays pauvres (réduction d'environ 15% de leurs émissions libres) et les trois régions moins développées reçoivent toutes un bénéfice net plus important qu'aux équilibres de Nash et de Pareto. Il s'agit donc à priori d'une proposition répondant de manière intéressante aux trois critères d'efficacité, d'efficacité et d'équité. Néanmoins, au fil du temps, les discussions de stabilisation ont évolué vers une réduction d'émissions pour certains et un « free riding » pour d'autres, ce qui est l'objet du troisième scénario.

Le Protocole de Kyoto proposait dans sa forme originale que l'AUS maintienne ses émissions au niveau de 1990 en 2010 (utilisé comme moyenne de la période 2008-2012). Les émissions des Etats Unis et des autres pays de l'OCDE (AOCDE) doivent diminuer respectivement de 7% et 7.3%. L'objectif de l'AOCDE (7.3%) a été calibré de telle manière que la réduction globale des émissions des pays de l'annexe I en 2010 atteigne 5.2% comme mentionné dans le Protocole. La restriction

supplémentaire imposée aux USA et AOCDE par rapport aux scénarios précédents et la forme de la courbe de coût de l'AUS (négative au départ puis exponentielle par après : OECD, 1993) expliquent les larges pertes nettes de ces trois régions. Ne subissant pas de restriction, les autres pays bénéficient de la dépollution globale et en tirent donc un bénéfice net. Il est intéressant de remarquer que le bénéfice net de la Chine n'est que très légèrement supérieur au scénario précédent impliquant une réduction des émissions de 16.5% (2353>2010) et celui du RDM est même inférieur dans ce cas de figure (3716<5151) puisque, selon les données des coûts, on y dépollue les premiers pourcentages à un coût négatif. L'impact environnemental du Protocole de Kyoto est significatif : c'est l'option qui donne l'évolution des émissions et de la température la plus acceptable comme illustré dans les deux graphiques, et de plus, la réglementation quantitative du Protocole entraîne presque un doublement de l'effort de réduction par rapport à la coalition des pays de l'OCDE et de la Russie (20.8 vs. 10.9). Il est néanmoins peu équitable aux yeux de l'ancienne Union Soviétique (perte de 823) et totalement inefficace du point de vue économique ($W = -6495$).

L'avantage le plus important du Protocole de Kyoto, appliqué par hypothèse jusqu'en 2100, est donc son efficacité environnementale attendue. Depuis lors, le refus des Etats Unis d'y adhérer induit un profond changement à moins que les autres pays de l'OCDE acceptent de faire un effort supplémentaire. En effet, si les Etats Unis décident d'être rationnels et donc de maximiser leur bénéfice net, selon les données de cette étude, ils seront amenés à un « free riding » complet. En somme, l'efficacité relative est en chute (les émissions globales diminuent de 12.5% au lieu de 20.8%) et le résultat attendu est plus éloigné de l'optimum de Pareto qu'une réduction uniforme (l'évolution de la réduction d'émissions et l'impact sur l'augmentation de la température est à mi-chemin entre la dépollution zéro et le Protocole de Kyoto

original : voir figures 1 et 2). Par ailleurs, ce résultat est obtenu à un coût social élevé ($W=-4147$) et est par conséquent inefficace quoique la perte sociale du Protocole de départ soit encore plus grande. De plus, il semble peu logique, au nom de l'équité, de spolier l'ancienne Union Soviétique (qui subit une perte nette) alors que les Etats Unis n'ont pas d'obligation environnementale.

4. Conclusion : efficacité, efficience, équité et interdisciplinarité

Même si elle est efficiente (optimum de Pareto) et relativement efficace (16.6% de réduction d'émission), la coopération globale n'est pas équitable : plus de deux tiers de l'effort global est réalisé par les pays non membres de l'OCDE. Même si elle est également efficiente dans l'optique où les pays ne peuvent trouver un accord de coopération (équilibre de Nash), la non coopération globale n'est ni efficace (5.8% de réduction d'émission) ni équitable (la quasi totalité de l'effort est réalisé par les pays pauvres). Même si une coopération partielle entre les AOCDE et AUS avec ou sans les USA est moyennement efficace (respectivement 10.9% et 8.4% de réduction d'émission), elle n'est pas complètement efficiente (pas de first best mais recherche de l'optimum individuel ou de groupe) et n'est certainement pas équitable puisque les deux options impliquent un transfert des pays pauvres vers les pays riches. Même si une réduction uniforme peut être aussi efficace que la politique coopérative globale, elle est immanquablement moins efficiente et assez neutre sur le plan de l'équité. Même si une stabilisation des émissions des pays de l'OCDE est efficace (17.1% et 27.6% de réduction d'émission respectivement sans contrainte et avec contrainte pour les autres pays) et équitable, elle ne peut se justifier économiquement. De même, le Protocole de Kyoto avec et sans les USA est également inefficace et inéquitable -

pour l'ancienne Union Soviétique - tout en étant particulièrement efficace d'un point de vue environnemental.

En somme, il semble quasiment impossible d'allier l'efficacité à l'efficacité et à l'équité. D'un point de vue économique, on peut mettre l'efficacité en exergue mais cela joue en défaveur des objectifs d'efficacité (un peu) et d'équité (beaucoup). D'un point de vue environnemental, on peut mettre la dépollution (efficacité) au premier plan mais cela fait passer pour moins importants les impacts économiques et humains. D'un point de vue social, on peut préférer un effort plus justement réparti (équité) mais cela joue parfois en défaveur de l'efficacité et va très souvent à l'encontre de l'efficacité.

L'enjeu va donc au delà d'une querelle classique entre environnementalistes, économistes et sociologues. S'il n'existe sans doute aucune solution idéale, c'est bien parce que le problème des changements climatiques ne peut pas être abordé comme faisant partie d'une seule discipline précise. En stylisant les disciplines à l'extrême, on peut dire les choses suivantes. Le physicien, le climatologue et le chimiste, aidés du mathématicien, modélisent la circulation, l'impact des océans et les évolutions et conséquences physiques. L'économiste évalue la pertinence économique de telle ou telle politique. L'environnementaliste détermine l'impact de certaines politiques sur l'écosystème. Le sociologue analyse l'impact social local, régional et global de décisions alternatives. Le juriste pose le cadre légal de l'application de telle ou telle politique et du principe de prévention. Enfin, le politicien négocie avec les différents groupes de pressions, les différents pouvoirs régionaux et ses homologues des autres pays. Au final, la proposition négociée et ratifiée est le reflet du poids relatif de chaque domaine d'activité, de l'influence de chaque pays sur les autres et de l'influence de chaque groupe de pression au sein d'un pays.

Il convient donc de relativiser la difficulté d'obtenir une solution optimale ou même sous optimale mais obligatoirement économiquement rationnelle à un problème aussi vaste. En effet, la proposition de solution internationale négociée n'est ni bonne ni mauvaise ; elle ne satisfait complètement aucune discipline, mais ne mécontente pas non plus tous les acteurs. Et sa mise en œuvre impliquera encore une étude interdisciplinaire au niveau régional où juristes, économistes, sociologues et environnementalistes défendront des points de vue qui, bien qu'étant souvent contradictoires, devront pouvoir trouver un terrain d'entente pour défendre au mieux et dans les meilleures conditions le capital naturel que nous avons reçu et que nous transmettrons à notre descendance.

Annexe : les équations et la dérivation du modèle

Calcul des bénéfices

Etape 1 : on estime la concentration de CO₂ dans le temps ($\Gamma(t)$) sur base des données régionales d'émissions ($E_j(t)$) :

$$\Gamma(t+1) = A\Gamma(t) + (\varepsilon\eta E(t)) \quad (A1)$$

où A est le facteur d'extinction associé à l'absorption de CO₂ par les océans, η est la fraction de CO₂ en suspension dans l'air, ε convertit les milliards de tonnes de carbone équivalent en ppmv (Chapman et Drennen, 1990) et $E(t) = \sum_j E_j(t)$. A , ε , η sont des paramètres connus.

Etape 2 : on estime le réchauffement à l'équilibre :

$$\Delta T(t) = \alpha \ln \Gamma(t) - \beta \quad (A2)$$

où α et β sont estimés sachant que $\Delta T(t)=0$ à l'époque préindustrielle et par hypothèse, $\Delta T(t) = v = 2.5$ au doublement de CO₂

Etape 3 : on calcule ensuite l'évolution des dommages temporels ($D_j(t)$) :

$$D_j(t) = \Omega_j Q_j(t) \left[\frac{\Delta T(t)}{v} \right]^\gamma \quad (A3)$$

où $Q_j(t)$ est le PIB régional, Ω_j , l'échelle des dommages régionaux au doublement de CO_2 (Fankhauser et Pearce, 1994) et γ un paramètre de non linéarité.

Etape 4 : on calcule les bénéfices en termes de dommages évités pour différentes politiques de restriction d'émission Θ :

$$B_j^\Theta(t) = D_j^B(t) - D_j^\Theta(t) \quad (A4)$$

où B vient de Business-as-Usual, ce qui signifie que les émissions sont libres.

Etape 5 : on actualise ensuite tous les bénéfices régionaux entre 1990 et 2100 en valeur de 1990 et on les somme sur toute la période pour obtenir un chiffre de bénéfice correspondant à une politique de restriction. On fait cela pour tous les pourcentages de restrictions possibles et on obtient donc une série de points dans l'espace des bénéfices par rapport aux restrictions. Il suffit alors d'estimer la meilleure fonction passant par ces points qui est :

$$B_j(\Theta) = \alpha_j \Theta + \sigma_j \Theta^2 \quad (A5)$$

Calcul des coûts

Les coûts temporels $C_j(t)$ sont estimés sur base de données existantes (OECD, 1993 ; Nordhaus, 1994) pour différentes politiques de restriction Θ . Comme dans l'étape 5 du calcul des bénéfices, ils sont ensuite actualisés en valeur de 1990 et sommés pour obtenir un point par politique dans l'espace des coûts par rapport aux restrictions. La meilleure fonction estimant la série de points obtenus est déterminée par l'équation

$$C_j(\Theta_j) = \lambda_j \Theta_j + \mu_j \Theta_j^2 \quad (A6)$$

Restriction optimale en coopération et non coopération

Les conditions de premier ordre de l'équation 2, sous contrainte de non négativité des restrictions, permettent de trouver la réduction optimale en non coopération qui, après simplification, équivaut à :

$$\Theta_j = \frac{\lambda_j - \alpha_j}{2(\sigma_j - \mu_j)} - \frac{\sigma_j}{\sigma_j - \mu_j} \left(\sum_{i \neq j} \Theta_i \right) \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (A7)$$

donnant une solution unique puisqu'il s'agit d'un système de N équations à N inconnues.

On procède ensuite de la même manière pour l'équation 3 et on trouve que la restriction coopérative régionale optimale est déterminée par :

$$\Theta_j = \frac{\lambda_j - \alpha - 2\sigma \sum_{i \neq j} \left(\frac{\lambda_j - \lambda_i}{2\mu_i} \right)}{2(\sigma - \mu_j) + 2\sigma \mu_j \sum_{i \neq j} (1/\mu_i)} \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A8})$$

Les données obtenues en résolvant ces équations sont présentées dans le Tableau I. Le bénéfice net, W_j se calcule ensuite en plaçant les valeurs Θ_j dans les équations 2 et 3.

Coopération partielle

On calcule ici les conditions de premier ordre des équations 4 (pour les M non coopérants) et 5 (pour les $Y=N - M$ membres de la coalition), ce qui nous permet de trouver les restrictions régionales optimales individuelles pour les pays faisant ou pas partie de la coalition.

La restriction optimale des entités restées hors d'une coalition est similaire à l'équation A7 :

$$\Theta_m = \frac{\lambda_m - \alpha_m}{2(\sigma_m - \mu_m)} - \frac{\sigma_m}{\sigma_m - \mu_m} \left(\sum_{s \neq m}^M \Theta_s \right) \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (\text{A9})$$

et celle des régions coopérant ensemble est

$$\Theta_y = \frac{\lambda_y - \alpha - 2\sigma \sum_{x \neq y}^Y \left(\frac{\lambda_y - \lambda_x}{2\mu_x} \right)}{2(\sigma - \mu_y) + 2\sigma \mu_y \sum_{x \neq y}^Y \frac{1}{\mu_x}} \quad \forall y = 1, 2, \dots, Y \quad (\text{A10})$$

Notes de fin

ⁱ La somme des émissions non restreintes de 1990 à 2100 pour les USA, AOCDE, AUS, Chine et RDM est respectivement de 299, 321, 163, 365 et 641 milliards de tonnes de carbone avec un total mondial de 1789 milliards de tonnes.

ⁱⁱ Les différences majeures avec le modèle de Nordhaus et Yang (1996) sont essentiellement liées à la valeur absolue des estimations de coûts et bénéfices ainsi qu'au taux d'actualisation mais les conclusions de base restent assez similaires.

ⁱⁱⁱ L'évolution temporelle des émissions et le réchauffement climatique à l'équilibre par rapport à la période préindustrielle sont calculés au moyen des équations en annexe (évolution de E_t et ΔT_t). On prend l'an 2000 comme point de départ (le modèle trouve une estimation d'augmentation de température de 1.16 degrés centigrades à l'équilibre depuis la période préindustrielle jusqu'en 2000).

^{iv} Le débat de la faisabilité d'une telle réduction pour les pays pauvres n'est pas abordé ici mais il est évident que, lorsque le problème est remis dans son contexte global et interdisciplinaire, ce point doit être étudié.

^v Quelle que soit l'option, la réduction d'émission est calculée à partir de 2010 comme prévu dans le Protocole de Kyoto (en fait, ce qui est prévu est une réduction pour la période 2008-2012), ce qui implique que les émissions sont libres entre 1990 et 2009.

^{vi} Dans ce cas, l'équation 2 n'est plus une maximisation mais un simple calcul de bénéfice net: on calcule donc W_j et non $\text{Max } W_j$.

Bibliographie

Barron, William ; Robert Perlack et John J. Boland, 1998. *Fundamentals of*

Economics for Environmental Managers, Quorum Books, Westport, Connecticut.

Chander, Parkash; H. Tulkens, J-P Van Ypersele et S. Willems, 1999. *The Kyoto Protocol: An Economic and Game Theoretic Interpretation*, CORE Research Paper, Center of Operations Research and Econometrics, UCL, Belgium.

Chapman, Duane et Thomas Drennen, 1990. Equity and Effectiveness of Possible CO₂ proposals, *Contemporary Policy Issues*, Vol.8, 16-28

Cline, William R., 1992. *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington, D.C.

-
- Fankhauser, Samuel et David Pearce, 1994. The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions, in *The Economics of Climate Change: Proceedings of an OECD/IEA Conference*, OCDE (eds.), Paris, 71-86.
- Hamaide, Bertrand et John J. Boland, 2000. Benefits, Costs and Cooperation in Greenhouse Gas Abatement, *Climatic Change*, Vol. 47, 239-258
- Lind, Robert C. (1990). Reassessing the Government's Discount Rate Policy in Light of New Theory and Data in a World Economy With a High Degree of Capital Mobility, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.18, 58-80.
- Manne, Alan S. et Richard G. Richels, 1992. *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of CO₂ Emission Limits*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Manne, Alan S., 1993. Global 2100: Alternative Scenarios for Reducing Carbon Emissions, in *The Costs of Cutting Carbon Emissions: Results from Global Models*, OECD (eds.), Paris, 55-66.
- Manne, Alan S. et Richard. G. Richels, 2000. The Kyoto Protocol: A Cost Effective Strategy for Meeting Environmental Objectives, in *Efficiency and Equity of Climate Change Policy*, C. Carraro (eds.), Elsevier, Pays Bas, 43-62.
- Nordhaus, William, 1994. *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Nordhaus, William et Zili Yang, 1996. A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies, *American Economic Review*, Vol 86 (4), 741-765.
- OECD, 1993. *The Costs of Cutting Carbon Emissions: Results from Global Models*, OECD, Paris.