

**Analyse économique de l'effet de serre et pertinence du
Protocole de Kyoto**

**Economic analysis of the greenhouse effect and relevance of the
Kyoto Protocol**

Bertrand Hamaide*

Facultés Universitaires Saint Louis
Faculté des sciences économiques, sociales et politiques
43 Boulevard du jardin botanique
1000 Bruxelles, Belgique
E-mail : hamaide@fusl.ac.be

* Une version partielle et antérieure de ce manuscrit a été présentée au Colloque « Sociologie, économie et environnement », Université Laval, Québec, Mai 2002. Je tiens à remercier les participants et spécialement Corine Gendron, Said Belguidoum et Guillaume Faburel. Je suis également très reconnaissant envers deux rapporteurs anonymes pour leurs commentaires précis, détaillés et particulièrement avisés. Je reste bien évidemment seul responsable des erreurs éventuelles.

Résumé

Une solution coopérative à l'effet de serre et le Protocole de Kyoto sont comparés sur les plans de l'efficacité, de l'efficacité et de l'équité. Si l'équité du Protocole peut contrebalancer son inefficacité en application du principe du pollueur-payeur, cette solution reste néanmoins souvent décriée par de nombreux économistes pour son inefficacité environnementale. On montre que contrairement à l'idée reçue, le Protocole analysé sur une certaine période est plus efficace qu'on ne le pense à priori puisqu'il réduit significativement les émissions en valeur absolue et impose un plus grand effort qu'une coalition des pays de l'annexe B.

The efficiency, effectiveness and equity of a cooperative solution to the greenhouse effect and the Kyoto Protocol are compared. Even if the Protocol's equity can be traded off against its inefficiency in application of the polluter pays principle, most economists do not favour this solution because of its environmental ineffectiveness. It is shown that contrary to common belief, the Protocol, analysed over a certain period, is more effective than generally perceived as it significantly reduces emissions in absolute value and imposes a larger abatement than a coalition of Annex B countries.

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 1.4 à 5.8 degrés Celsius en 2100 [IPCC, (2001)], avec une valeur de 2.5 degrés à l'équilibre pour cette étude lors du doublement futur de la concentration de CO₂ par rapport à la période préindustrielle, estimé ici vers 2070. 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 le Sommet de Johannesburg en 2002.

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. 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 une dizaine d'années et ont débouché sur le Protocole de Kyoto) et accords de coopération entre différentes parties en vue de réduire leurs émissions propres.

On étudie d'abord 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. C'est l'objet de la seconde section. La troisième section prend le problème à l'envers : on part de la politique négociée à Kyoto (et non de la théorie économique) et on étudie sa pertinence. La dernière section conclut le travail en insistant sur la relative efficience, efficacité et équité des résultats obtenus et en montrant que le Protocole de Kyoto, même dans son état actuel, est sans doute une politique bien moins anodine que d'aucuns le prétendent.

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

2.1. LES HYPOTHESES DE BASE ET LEURS IMPACTS

Le monde est divisé en cinq groupes 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 milliards 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^1 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 ($\lambda=2.5$) est utilisé dans le calcul des dommages.

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

¹ 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.

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 quoique certains auteurs aient développé des modèles récents avec davantage de joueurs [Nordhaus et Yang, (1996)]. Le RDM – Reste du Monde – est certainement trop hétérogène (par exemple, l'Arabie Saoudite, l'Inde et le Togo en font tous trois partie 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 : les coûts et bénéfices (voir infra, section 2.2 pour les hypothèses concernant les coûts et bénéfices) s'étalent de 1990 à 2100, sont actualisés et exprimés en fonction d'une réduction globale d'émissions. 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 dès lors 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 les bénéfices sans avoir d'impact significatif sur les coûts et bénéfices régionaux agrégés dans le temps.

2.2. HYPOTHESES ET CALCULS DE COÛTS ET BENEFICES

Les bénéfices sont calculés comme la valeur monétaire des dommages évités en entreprenant une politique restreignant les émissions par rapport à une situation sans contrainte (dénommée « business-as-usual »). La procédure, en cinq étapes, est détaillée à l'annexe 1.

Elle consiste, dans un premier temps, à calculer la moyenne arithmétique des données d'émissions de gaz à effet de serre estimées par d'autres chercheurs [Manne

et Richels, (1992) ; OECD, (1993)] entre 1990 et 2100, ce qui permet de dériver la concentration de CO₂ dans le temps. Cette première étape est déjà empreinte d'incertitudes dues à la structure des modèles utilisés, la manière de calibrer les données ainsi qu'à la prévision elle-même [Yohe, (2003)].

Les étapes suivantes consistent en l'estimation des dommages régionaux au doublement de la concentration de CO₂, puis leur évolution temporelle afin de pouvoir estimer les bénéfices régionaux de politiques restrictives à diverses périodes ainsi que sur toute la durée de l'analyse [Hamaide et Boland, (2000)] en les actualisant au taux uniforme de 2%. En d'autres termes, on calcule $B_j=f(\Theta)$.

Ces étapes ne font donc qu'accroître l'incertitude des données. Quelle crédibilité peut-on alors donner à de telles estimations ? Afin d'apporter un élément de réponse, Roughgarden et Schneider [1999] ont comparé les estimations de dommages temporels provenant d'experts en sciences naturelles, en économie de l'environnement et en sciences sociales. Ils ont trouvé que le modèle de Nordhaus [1994] était comparable aux données provenant des experts en sciences sociales, c'est-à-dire plus optimistes que les économistes de l'environnement et que les naturalistes, ces derniers étant les plus pessimistes. Comme illustré à la Figure 1, la valeur des dommages exposés ici est assez similaire à la moyenne de l'avis de tous les experts confondus.

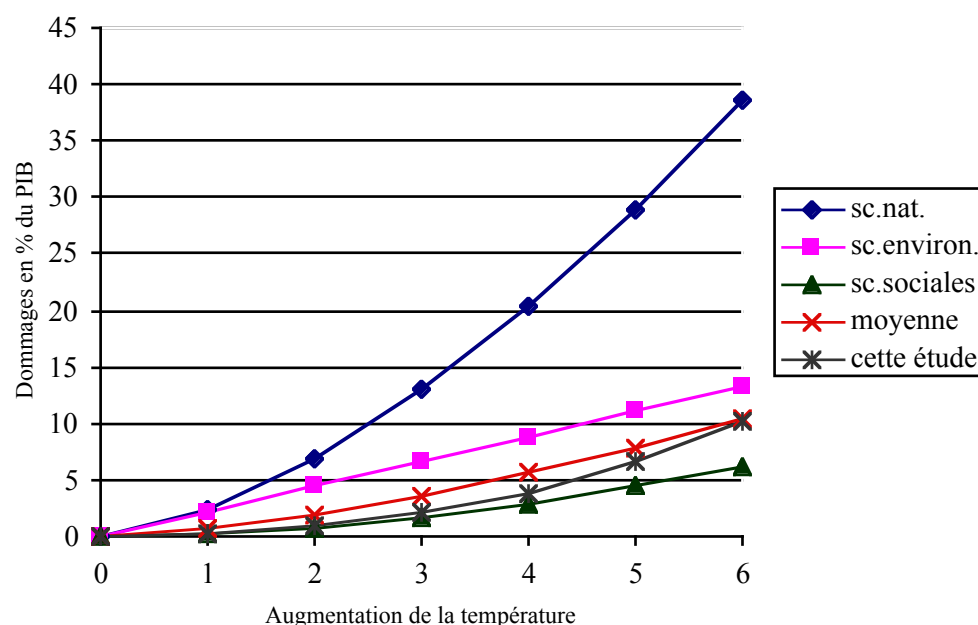


Figure 1 : Comparaison des dommages (exprimés en pour cent du PIB mondial) en fonction de l'augmentation de la température (en degrés Celsius)

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 CO₂

Les coûts temporels $C_j(t)$ sont estimés sur base de certaines données existantes [OECD, (1993) ; Nordhaus, (1994)] pour différentes politiques de restriction Θ . 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. Le processus est répété plusieurs fois et une fonction polynomiale du second degré a donné la meilleure estimation pour la série de points obtenus².

L'IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change – [2001] a comparé neuf modèles d'estimation de coûts bruts du Protocole de Kyoto, en 2010, pour les pays industrialisés. La réduction estimée du Produit Mondial Brut varie de 0.2 à 2 pour cent ou de 0.1 à 1.1 pour cent, respectivement sans et avec échange de droits d'émission. La variabilité importante reflète la diversité des hypothèses de départ, ce qui influence à la fois les émissions et les coûts de contrôle [Dowlatabadi, (2003)]. Les coûts présentés dans cette étude n'incluent pas la possibilité d'échanger des droits d'émission et peuvent donc être considérés comme des coûts maximum, même si, à titre de comparaison, le coût brut du Protocole de Kyoto dans ce modèle est de 0.1%³, ce qui constitue la borne inférieure des modèles étudiés par l'IPCC.

En somme, les bénéfices estimés ici se trouvent un peu en dessous de la moyenne des avis des experts provenant à la fois des sciences sociales et des sciences naturelles et sont sensiblement supérieurs à ceux de Nordhaus. Quant aux coûts globaux, ils semblent comparables à ceux estimés dans les recherches intégrant la possibilité d'échange de droits d'émission. Ces estimations ne semblent donc ni démesurées ni conservatrices. Elles demeurent néanmoins hypothétiques et les

² La formule est $C_j(\Theta_j) = \lambda_j \Theta_j + \mu_j \Theta_j^2$

³ Le coût du Protocole de Kyoto a été calculé pour les USA et les autres pays de l'OCDE (AOCDE) sur base de l'équation de la note 2 en restreignant les émissions régionales au niveau de 1990 entre cette date et 2010.

résultats du modèle ne peuvent être crédibles que si ces estimations préalables des coûts et des bénéfices sont également crédibles, ce qui oblige à les interpréter avec précaution. Ceci est malheureusement vrai pour toute estimation algébrique.

Les coûts et les bénéfices, s'étalant de 1990 à 2100, sont actualisés⁴ au taux uniforme de 2% [Lind, (1990)]. 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. Néanmoins, la préférence temporelle et les rendements des capitaux sont des notions incontestables et l'actualisation permet de comparer des projets alternatifs.

En conclusion, une analyse coût-bénéfice se base sur un certain nombre d'hypothèses, qui peuvent être considérées 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 requièrent donc une certaine prudence dans leur interprétation.

2.3. LES OBJECTIFS DU MODELE DE COÛT-BENEFICE

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 en prenant les décisions des autres entités comme données

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

⁴ En comparaison avec le modèle de Nordhaus et Yang [1996], les différences majeures sont essentiellement liées à la valeur absolue des estimations de coûts et bénéfices ainsi qu'au taux d'actualisation plus élevé chez ces auteurs mais les conclusions de base restent assez similaires.

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 des paramètres en Annexe 1).

L'efficacité économique globale au sens de Pareto exige une coopération complète. L'objectif est donc de maximiser le bien-être social⁵, 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 $C_y'(\Theta_y) = \sum_y B_y'(\Theta)$.

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

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

et $M + Y = N$.

⁵ Le calcul de bien être, coopératif et non coopératif, est donc établi en prenant la situation sans aucune politique climatique, c'est-à-dire sans aucune restriction dans les émissions de gaz à effet de serre ($\Theta_j = \Theta = 0$), comme point zéro. Autrement dit, $\Theta_j = \Theta = 0$ implique que $W_j = W = 0$. Un bien-être négatif pour une politique restrictive se comprend donc comme une perte de bien-être par rapport à une politique climatique inexistante (business as usual) et un bien-être positif signifie une amélioration par rapport à la situation business as usual.

2.4. LES RESULTATS

La procédure de calcul des montants optimaux régionaux de dépollution en valeur absolue (Θ_j) sur 110 ans et en pourcentage ($R_j = \Theta_j/E_j$) est détaillée en Annexe 2. Ces résultats, 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 social) sont illustrés dans le Tableau I. La comparaison entre coûts et bénéfices en vue de trouver un optimum ne prend en compte ni l'aversion au risque, ni l'irréversibilité ni les modifications éventuelles de choix politiques dues à l'arrivée d'information nouvelle sur l'état de la science des changements climatiques. La valeur d'option, dont l'importance a été soulevée par Guesnerie [2002] est donc absente de cette analyse.

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 social et induit un bénéfice net global nettement supérieur (6305 par rapport à 4355).

	Θ_j non coopératif	W_j non coop $W_j = B_j - C_j$	Θ_j coopératif	W_j coop $W_j = B_j - C_j$
USA	0% (0)	354=354-0	14.7% (44.23)	282=1001-719
AOCDE	1.5% (4.79)	624=647-23	14.5% (46.25)	1105=1833-728
AUS	10.9% (17.76)	1139=209+930	13.3% (21.70)	1468=594+874
Chine	0% (0)	667=667-0	17.6% (64.36)	637=1884-1247
RDM	12.8% (82.04)	1571=1045+526	18.9% (120.55)	2813=2968-155
Total	5.8% (104.59)	4355	16.6% (297.09)	6305

Tableau I: Réductions d'émissions (Θ_j) en pourcentage et en milliards de tonnes de carbone équivalent sur la période 1990-2100 (entre parenthèses) et bénéfices nets (W_j) ou bénéfices (B_j) moins coûts (C_j) en milliards de dollars à prix constant de 1990.

Ces résultats sont examinés ci-après sous les angles de l'efficacité, de l'efficacités et de l'équité. L'*efficacités* est comprise ici comme un équilibre économique ; l'optimum social est dit efficient. L'*efficacités* est entendue ici comme l'importance de l'impact d'une politique ; plus la politique hypothétique réduit les émissions, plus elle sera qualifiée d'efficace. Le concept d'*équité* est plus ardu à définir car il n'existe pas de consensus sur une définition précise [Rose et al., (1998)]. L'équité sera comprise ici comme l'obligation de demander davantage d'efforts aux pays riches, ayant historiquement exploité l'environnement pour leur développement économique, qu'aux pays pauvres. Ce critère d'équité particulier se rapproche donc du principe du pollueur-payeur⁶.

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'efficacités 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 s'appliquer, ce qui est théoriquement possible puisque les montants gagnés sont largement supérieurs aux montants perdus, pour que la solution coopérative soit applicable.

⁶ Le principe du pollueur-payeur comme critère d'équité et d'autres notions d'équité dans le domaine des changements climatiques sont développés et comparés par plusieurs auteurs. On peut citer, entre autres, Bosello et al. [2003], Vaillancourt et Waaub [2003] et Tol [2001].

Cette compensation peut aussi s'envisager en termes non monétaires (redistribution des quotas régionaux, aide technologique, ...).

Les résultats théoriques du Tableau I devraient néanmoins être rejetés en regard du principe d'équité. En effet, en cas de non coopération, 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. Il est évidemment illusoire de penser qu'une telle proposition, même si elle est efficiente, puisse être négociée lors d'une Conférence des Parties. Elle serait en effet contraire aux discussions entre les Parties depuis 1992 et au principe du pollueur-payeur. Cette conclusion reste valable en cas de coopération globale car les restrictions incombent encore très majoritairement aux pays pauvres (près de 70% ou 206.61 milliards de tonnes sur 297.09). Qui plus est, le problème d'équité est encore exacerbé par le fait que les États Unis, ayant un bien-être inférieur en cas de coopération globale, devraient théoriquement recevoir des paiements compensatoires pour que l'optimum social soit atteint, alors qu'ils restent aujourd'hui 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 l'effort disproportionné que cela entraînerait pour les pays en développement et cela 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 B du Protocole de Kyoto (USA+AOCDE+AUS) et cette même coalition amputée des 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 2) 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	
	$W_j=B_j-C_j$	R_j en %	$W_j=B_j-C_j$	R_j en %
USA	-68=659-727	14.8	511=511-0	0
AOCDE	469=1205-736	14.5	196=934-738	15.5
AUS	1257=390+867	13.8	1168=302+866	13.8
Chine	1240=1240-0	0	962=962-0	0
RDM	2475=1949+526	12.8	2035=1509+526	12.8
W,R	5374	10.9	4872	8.4

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

La première coalition hypothétique, 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 coopérative et non coopérative pour un bénéfice net d'une ampleur moyenne entre les objectifs précédents. La seconde coalition hypothétique illustre le fait que les États-Unis ont décidé unilatéralement de ne pas ratifier le Protocole de Kyoto. 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 coalition du Tableau II 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 »⁷.

⁷ Notons que le RDM (Reste du Monde) a un bien-être plus élevé en solution coopérative que dans les deux coalitions hypothétiques. Les Tableaux I et II montrent

Sur le plan de l'équité, comme auparavant, aucune des deux propositions n'est viable en pratique même si elles peuvent être justifiées d'un point de vue strictement économique. De fait, la première coalition impose techniquement une compensation des pays moins industrialisés (AUS, Chine, RDM) aux pays de l'OCDE, pour être globalement profitable par rapport à la solution non coopérative, alors que le principe du pollueur-payeur exige une prise de responsabilité des pays riches pour leur pollution passée avant un éventuel effort des pays pauvres, à négocier dans un second temps. La seconde coalition est tout aussi inéquitable : les pays pauvres seraient amenés à « subsidier » les pays riches et les États-Unis seraient dispensés de tout effort de dépollution (« free riding », étant donné leur courbe de coût élevée). Même si les transferts monétaires sont mathématiquement réalisables, ces deux coalitions hypothétiques n'ont donc que peu (ou pas) de sens pratique.

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.

3. Le Protocole de Kyoto: abandonner l'efficacité mais garder au mieux l'équité

L'objet de cette section est davantage pragmatique plutôt qu'économique. Sachant qu'un optimum social (coopération générale) ou un optimum de second rang (coopération partielle) ne seront pas atteints, il s'agit maintenant de partir d'un élément négocié – le Protocole de Kyoto - et ensuite déterminer sa pertinence relative du point de vue économique et environnemental.

que les bénéfices pour le RDM augmentent substantiellement avec une plus grande restriction des émissions globales (ces régions étant particulièrement sensibles aux changements climatiques attendus) alors que le coût de leurs restrictions est très faible (restructurations énergétiques plutôt qu'investissements).

Les deux scénarios considérés sont donc les suivants⁸ : a) le Protocole de Kyoto original stipulant une diminution des émissions de 5.2% pour les pays de l'Annexe B en 2008-2012 sans autre restriction formelle pour les autres pays et b) 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 2⁹, sont illustrés dans le Tableau III.

	Scenario 1			Scenario 2		
	$W_j=B_j-C_j$	Θ_j	R_j	$W_j=B_j-C_j$	Θ_j	R_j
USA	-5231=1251-6482	149	49.8	753=753-0	0	0
AOCDE	-6510=2292-8802	177	55.3	-7425=1377-8802	177	55.3
AUS	-823=743-1566	46	28.2	-1121=446-1567	46	28.2
Chine	2353=2353-0	0	0	1417=1417-0	0	0
RDM	3716=3716-0	0	0	2229=2229-0	0	0
W, Θ, R	-6495	372	20.8	-4147	223	12.5

Tableau III: Bénéfice net régional (W_j) ou bénéfices (B_j) moins coûts (C_j) – en Md. US\$ - et réduction d'émission en Md. T (Θ_j) et en pourcentage (R_j) pour le Protocole de Kyoto avec (scénario 1) et sans (scénario 2) les USA

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

⁸ 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.

⁹ 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 $\text{Max } W_j$.

(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 B en 2010 atteigne 5.2% comme mentionné dans le Protocole.

La restriction non négligeable imposée aux USA et AOCDE 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 régions¹⁰. Ne subissant pas de restriction, les autres pays bénéficient de la dépollution globale et en tirent donc un bénéfice. La perte nette du Protocole de Kyoto est très large ($W=-6495$). Elle est bien évidemment due aux coûts de réduction des émissions dans les pays de l'annexe B (OCDE et ancienne Union Soviétique). Ce n'est donc pas d'un point de vue économique que le Protocole a pu être négocié ni rédigé car la rationalité économique aurait empêché sa ratification par les pays riches.

La politique du Protocole de Kyoto a été définie ici comme « Kyoto forever », ce qui signifie que le Protocole est respecté de 2010 à 2100 sans aucun effort additionnel des pays signataires et sans aucune restriction imposée ou implémentée volontairement dans les pays en voie de développement. En procédant de la sorte, le but est de déterminer une politique minimaliste. En effet, les obligations du Protocole ne sont qu'un premier pas et de nouvelles négociations (avec des efforts supplémentaires pour les pays développés et une participation éventuelle des pays moins développés) débiteront dans quelques années. Autrement dit, le Protocole de Kyoto, pris comme base jusqu'en 2100, est vraisemblablement la politique environnementale post-2010 la plus laxiste. Ne le considérer que jusque 2010 dans cette analyse globalisant les données jusque 2100 signifierait que rien ne se passe postérieurement à 2010, ce qui ne sera très vraisemblablement pas le cas.

¹⁰ Si les bénéfices d'une politique stricte de réduction d'émissions dans les pays riches est non négligeable (voir l'évolution des bénéfices entre les Tableaux I, II et III), les coûts de dépollution de ces pays dépassent très largement les bénéfices pour une réduction substantielle (cfr. Tableau III). Ceci s'explique par la courbe des coûts des pays riches, plus pentue que celle des pays pauvres. La différence dans la forme des courbes est en partie due au fait que des efforts de maîtrise d'énergie ont déjà été réalisés par les pays développés alors qu'un large gain d'efficacité (en évoluant par exemple du charbon vers un type d'énergie moins polluant) peut entraîner des réductions d'émissions à faible coût dans les pays moins développés.

L'impact environnemental du Protocole de Kyoto, globalisé entre aujourd'hui et l'année 2100, est particulièrement significatif. Il implique en effet une réduction de 20.8% des émissions « Business-as-Usual » (voir Figure 2 pour l'évolution temporelle), ce qui est supérieur à l'effort en coopération globale et double l'effort de réduction par rapport à la coalition des pays de l'OCDE et de la Russie (20.8 vs. 10.9). Cela entraîne, en 2100, un tassement de près de 17% dans l'augmentation de la température à l'équilibre (Figure 3). Si l'écart de température et d'émissions entre le Protocole original et la situation libre (Business-as-Usual) peut paraître assez faible, cet accord permet néanmoins de « gagner » plus de 20 ans d'émissions et plus de 25 ans d'augmentation de température¹¹.

L'aspect de l'équité a été particulièrement étudié puisque les pays en développement ne subissent aucune restriction et qu'il revient aux pays industrialisés de payer pour les émissions historiques de gaz à effet de serre depuis le début de l'industrialisation. Le principe d'équité qui prévaut ici est donc bien celui du pollueur-payeur. Le Protocole sans droits d'émission est néanmoins peu équitable aux yeux de l'ancienne Union Soviétique qui perd 823 alors qu'elle reçoit un bénéfice net en coopération globale, en non-coopération et en coopération partielle¹² (même lorsqu'elle fait partie de la coalition avec les pays de l'OCDE).

¹¹ En 2100, l'augmentation de température et les émissions correspondraient alors respectivement à une température et des émissions libres de 2075 et 2080.

¹² Les droits d'émission, tout comme les autres mécanismes de flexibilité du Protocole de Kyoto, ne sont pas intégrés dans cette étude. S'ils l'étaient, plusieurs recherches (parmi lesquelles Bohringer, [2002]) documentent que la Russie a un potentiel énorme de vente de permis, ce qui aurait certainement un impact positif sur son bénéfice net et rendrait donc le Protocole équitable aux yeux de cette région.

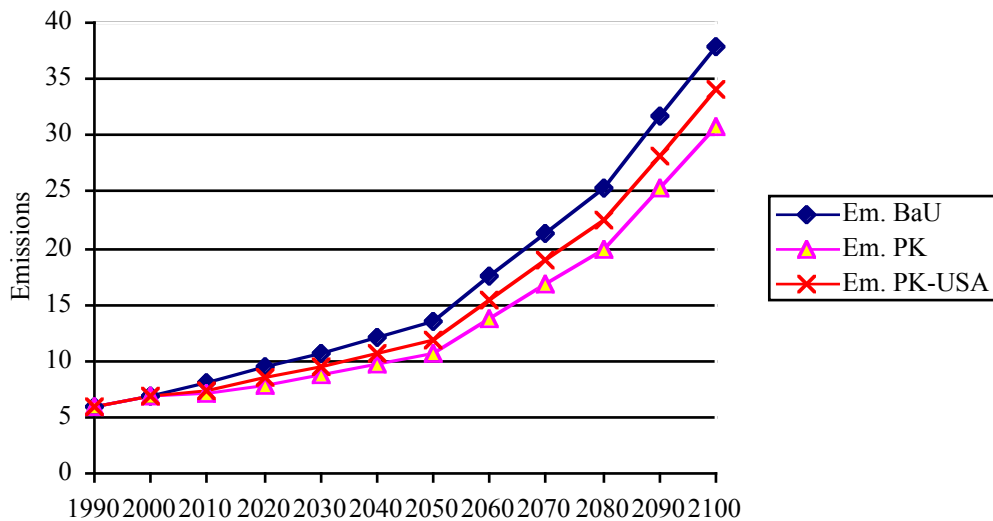


Figure 2 : Évolution temporelle des émissions libres et sous le Protocole de Kyoto avec (PK) et sans (PK-USA) les USA.

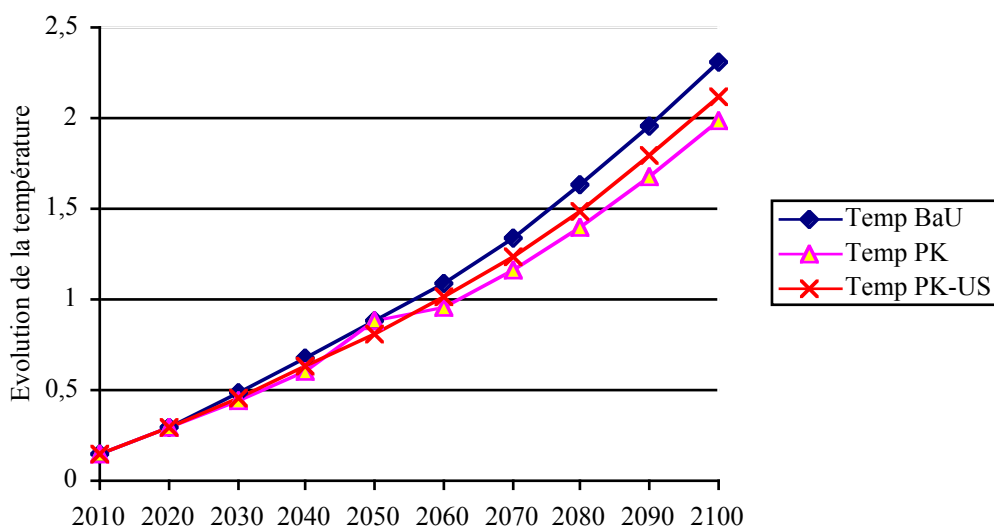


Figure 3 : Évolution de la température d'équilibre pour les émissions libres et sous le Protocole de Kyoto avec (PK) et sans (PK-US) les USA

Les avantages les plus importants du Protocole de Kyoto, tel qu'il a été défini en 1997, sont donc son efficacité environnementale attendue et l'application du principe du pollueur-payeur. 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% (Tableau III). Par ailleurs, l'évolution de la réduction d'émissions ainsi que l'impact sur l'augmentation de la température est à mi-chemin entre la dépollution zéro et le Protocole de Kyoto original, comme illustré dans les figures 2 et 3. Ceci étant, ce résultat reste nettement supérieur aux coalitions hypothétiques (Tableau II) entre d'une part l'AOCDE et l'AUS (réduction de 8.4%) et d'autre part entre les pays de l'annexe B (réduction de 10.9%). Le Protocole de Kyoto actuel, s'il est valide jusqu'en 2100 (Kyoto forever) achève donc mieux sur le plan environnemental qu'une coopération (coalition) entre pays riches et n'est pas trop éloigné de l'effort global obtenu à l'optimum social (16.6%), tel qu'illustré au Tableau I.

La restriction d'émissions est néanmoins obtenue de manière inefficace. Le coût social est élevé ($W=-4147$) et, s'il semble moins désavantageux que le coût engendré par le Protocole original, c'est uniquement dû au free riding des Etats-Unis qui, d'un côté, tirent leur bien-être vers le haut mais de l'autre, empirent le coût net de tous les autres acteurs.

Le seul problème d'équité du Protocole original provenait de la perte nette de l'ancienne Union Soviétique. Elle s'en trouve exacerbée ici (perte de 1121 au lieu de 823) et s'oppose au fait que les Etats-Unis n'ont pas d'obligation environnementale. Elle semble donc justifier les réticences de l'ancienne Union Soviétique quant à la ratification du Protocole et la demande, aujourd'hui acceptée, d'un plan avantageux pour elle sur les puits de carbone. Il est probable que cet accord récent contrebalance la perte de ce pays et le conduise à ratifier rapidement le Protocole.

En somme, le Protocole de Kyoto, analysé jusqu'en 2100, même sans les USA, réduit les émissions globales et provoque un tassement de l'augmentation de température non négligeable en comparaison avec l'étude économique de coopération partielle et globale.

4. Conclusion : efficacité, efficience, équité et pertinence du Protocole de Kyoto

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 impliqueraient un transfert des pays pauvres vers les pays riches, ce qui est contraire au principe du pollueur-payeur. De même, le Protocole de Kyoto avec et sans les USA est également inefficent tout en étant assez efficace d'un point de vue environnemental et nettement moins inéquitable pour l'AUS depuis que cette région a la certitude d'avoir un quasi monopole sur les ventes de permis futurs. Ces résultats s'entendent évidemment pour des données soumises à différentes hypothèses. Si le taux d'actualisation avait été fixé à 1% au lieu de 2%, la valeur agrégée des bénéfices s'en serait trouvée augmentée et la coopération, qu'elle soit globale ou partielle, plus élevée, entraînant donc une plus grande efficacité sans modification automatique du critère d'équité. Par corollaire, un taux d'actualisation plus élevé – 3% - reviendrait à amoindrir les restrictions optimales d'émission, comme dans Nordhaus et Yang [1996].

S'il semble quasiment impossible d'allier l'efficience à l'efficacité et à l'équité, il convient de relativiser la difficulté d'obtenir une solution optimale ou même sous optimale mais obligatoirement économiquement rationnelle ou efficiente à un problème aussi vaste. Le Protocole de Kyoto est très souvent décrié par de nombreux économistes [Bohringer, (2002) ; Hagem et Holtmark, (2001)] car son impact environnemental en 2010, suite à la non ratification des USA et à l'estimation du prix de vente de permis par l'AUS, semble minime. En analysant cette politique dans une perspective de plus long terme – jusqu'en 2100 -, l'efficacité s'en trouve nettement améliorée. Quant au futur, Guesnerie [2002] souligne que les pays riches,

même sans les USA, devront présenter des solutions avantageuses et généreuses à court terme pour les pays en développement afin de les associer à moyen terme à des restrictions communes. Quels que soient les efforts supplémentaires des pays riches et ceux des pays pauvres, ils ne pourront contribuer qu'à améliorer la situation du « Kyoto forever » décrite ici et qui est déjà plus intéressante que souvent mentionné lorsqu'elle est analysée au-delà de la première période d'engagement – son impact environnemental est situé entre une coalition des pays de l'annexe B et l'optimum social.

Le Protocole de Kyoto actuel semble donc justifié et approprié car même sans la participation des Etats-Unis, il reste efficace et les mécanismes flexibles négociés ont encore augmenté son équité. Paradoxalement, et contrairement à la rhétorique habituelle, il semblerait que ce soit le mécanisme qui aujourd'hui respecte le plus les idéaux d'efficacité et d'équité de la communauté internationale. L'inefficience s'explique alors simplement comme un moyen pour les pays riches d'internaliser leurs externalités passées.

Bibliographie

- Bohringer, C. [2002], « Climate Politics from Kyoto to Bonn: From Little to Nothing? », *Energy Journal*, Vol.23 n° 2, p. 51-71.
- Bosello, F.; B. Buchner; C. Carraro et D. Raggi [2003], « Can Equity Enhance Efficiency? Lessons from Climate Negotiations », *CEPR Disc. Paper* 3606.
- Chander, P.; H. Tulkens; J-P Van Ypersele [1999], « The Kyoto Protocol: Economic and Game Theoretic Interpretation », *CORE Res. Paper*, UCL, Belgium.
- Cline, W. [1992], *The Economics of Global Warming*, Institute for International Economics, Washington, D.C.
- Dowlatabadi, H. [2003], « What do we Know about Climate Policy and How can we Learn More » dans OECD (Ed.), *Workshop on the Benefits of Climate Policy*, OCDE, Paris.
- Fankhauser, S. et D. Pearce [1994], « The Social Costs of Greenhouse Gas Emissions » dans OECD (Ed.), *The Economics of Climate Change*, OCDE, Paris, p. 71-86.
- Guesnerie, R. [2002], *Les Enjeux Economiques de l'Effet de Serre*, Rapport au Conseil d'analyse économique, Paris, Octobre 2002, 63p.
- Hagem, C. et B. Holtsmark [2001], « From Small to Insignificant: Climate Impact of the Kyoto Protocol With and Without US ». *CICERO Policy note*, Norvège.
- Hamaide, B. et J. Boland [2000], « Benefits, Costs and Cooperation in Greenhouse Gas Abatement », *Climatic Change*, Vol. 47, p. 239-258
- IPCC [2001], *IPCC Third Assessment Report – Climate Change 2001*, Rapport du Groupe du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, 2001.
- Lind, R. [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, p. 58-80.
- Manne, A. et R. Richels [1992], *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of CO₂ Emission Limits*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Manne, A. [1993], « Global 2100: Alternative Scenarios for Reducing Carbon Emissions » dans OECD (Ed.), *The Costs of Cutting Carbon Emissions*, Paris, p. 55-66.

- Manne, A. et R. Richels [2000], « The Kyoto Protocol: A Cost Effective Strategy for Meeting Environmental Objectives », dans C. Carraro (Ed.), *Efficiency and Equity of Climate Change Policy*, Elsevier, Pays Bas, p. 43-62.
- Nordhaus, W. [1994], *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Nordhaus, W. et Z. Yang [1996], « A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies », *Amer. Econ. Review*, Vol. 86, p. 741-765.
- OECD [1993], *The Costs of Cutting Carbon Emissions: Results from Global Models*, OECD Documents, Paris.
- Roughgarden, T. et S. Schneider [1999], « Climate Policy: Quantifying Uncertainties for Damages and Optimal Carbon Taxes », *Energy Policy*, Vol. 27, p. 415-429.
- Rose, A; B. Stevens, J. Edmonds et M. Wise [1998], « International Equity and Differentiation in Global Warming Policy », *Environmental and Resource Economics*, Vol. 12, p. 25-51.
- Tol, R. [2001], « Equitable Cost-Benefit Analysis of Climate Change Policies », *Ecological Economics*, Vol. 36, p. 71-85.
- Vaillancourt K. et J-P Waaub [2003], « Equity in International Greenhouse Gases Abatement Scenarios: A Multicriteria Approach », *European Journal of Operational Research*, Vol.153, p. 489-505.
- Yohe, G. [2003], « Estimating Benefits: Other Issues Concerning Market Impacts », dans OECD (Ed.), *Workshop on the Benefits of Climate Policy*, OCDE, Paris.

Annexe 1 : calcul et dérivation des bénéfices

Étape 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 et $E(t)=\sum_j E_j(t)$. A , ε , η sont des paramètres connus.

Étape 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

Étape 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 CO₂ [Fankhauser et Pearce, (1994)] et γ un paramètre de non-linéarité.

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

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

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

Étape 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 l'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 :

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

Annexe 2 : coopération, coopération partielle et non coopération

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 :

$$\Theta_j = \frac{\lambda_j - \alpha_j}{2(\sigma_j - \mu_j)} - \frac{\sigma_j}{\sigma_j - \mu_j} \left(\sum_{i \neq j} \Theta_i \right) \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A6})$$

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 :

$$\Theta_j = \frac{\lambda_j - \alpha - 2\sigma \sum_{i \neq j} \left(\frac{\lambda_i - \alpha}{2\mu_i} \right)}{2(\sigma - \mu_j) + 2\sigma \mu_j \sum_{i \neq j} (1/\mu_i)} \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{A7})$$

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 :

$$\Theta_m = \frac{\lambda_m - \alpha_m}{2(\sigma_m - \mu_m)} - \frac{\sigma_m}{\sigma_m - \mu_m} \left(\sum_{s \neq m}^M \Theta_s \right) \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \quad (\text{A8})$$

et celle des régions coopérant ensemble est

$$\Theta_y = \frac{\lambda_y - \alpha - 2\sigma \sum_{x \neq y}^Y \left(\frac{\lambda_y - \lambda_x}{2\mu_x} \right)}{2(\sigma - \mu_y) + 2\sigma\mu_y \sum_{x \neq y}^Y \frac{1}{\mu_x}} \quad \forall y = 1, 2, \dots, Y \quad (\text{A9})$$